

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**



**DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA TRATAMIENTO DE BAJOS  
VOLÚMENES DE ACEITE DIELECTRICO (PCB) PARA SU  
REUTILIZACIÓN EN LOS TRANSFORMADORES DE  
DISTRIBUCIÓN AÉREO DE MEDIA TENSIÓN EN LA CIUDAD  
DE CHICLAYO**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

**AUTOR**

**LUIS ELMER GONZALES ARRASCO**

**ASESOR**

**LUIS ALBERTO GONZALES BAZAN**

<https://orcid.org/0000-0003-3941-9581>

**Chiclayo, 2021**

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA TRATAMIENTO DE BAJOS  
VOLÚMENES DE ACEITE DIELECTRICO (PCB) PARA SU  
REUTILIZACIÓN EN LOS TRANSFORMADORES DE  
DISTRIBUCIÓN AÉREO DE MEDIA TENSIÓN EN LA CIUDAD  
DE CHICLAYO**

PRESENTADA POR

**LUIS ELMER GONZALES ARRASCO**

A la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo  
para optar el título de

**INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

APROBADA POR

Alexander Querevalu Morante

PRESIDENTE

Lucio Llontop Mendoza

SECRETARIO

Luis Alberto Gonzales Bazan

VOCAL

## **Dedicatoria**

A Dios por los padres y hermanos que me dio,  
A mis padres por estar siempre conmigo,  
A mi esposa Guisselly por siempre motivarme a ser mejor.  
A mi pequeño hijo Mathias Rafael.

## **Agradecimiento**

Al Ingeniero Lucio Llontop y los demás ingenieros que me apoyaron en el desarrollo de mi tesis.

A mi familia por apoyarme siempre, por estar pendiente de mí y brindarme la oportunidad de ser un profesional.

A mi esposa Guisselly porque nunca me dejó rendirme y siempre estuvo para darme ánimos para seguir, por motivarme a ser mejor persona.

## INDICE

I. INTRODUCCIÓN .....	10
II. OBJETIVO .....	11
2.1 Objetivo general.....	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
III. JUSTIFICACIÓN .....	12
IV. MARCO TEÓRICO.....	13
4.1 Antecedentes .....	13
4.2 Transformadores .....	14
4.2.1 Clasificación de los transformadores .....	15
4.1.1.3 Según el modo de utilización: .....	16
4.1.2 Componentes:.....	16
4.1.3 Sistema de Enfriamiento o refrigeración.....	19
4.1.4 Principales partes del transformador .....	20
4.1.5 Tipos de lubricantes para transformadores.....	21
4.1.5.2 Aceites Sintéticos .....	21
4.3 Aceite Dieléctrico (MINERAL).....	21
4.3.1 Composición de un aceite dieléctrico.....	22
4.3.2 Aceites bases .....	22
4.3.3 Propiedades .....	24
4.3.4 Factores que deterioran el estado del aceite .....	27
4.3.5 Envejecimiento del aceite mineral aislante .....	29
4.3.6 Pruebas de Evaluación del Aceite Dieléctrico .....	32
4.4 Bifenilos Policlorados (PCB).....	39
4.4.1 Introducción .....	39
4.4.2 Marco Legal del Manejo de PCB en el Perú.....	40
4.3.3 Historia y antecedentes .....	41
4.4.4 Producción y uso .....	42
4.4.5 Características .....	44
4.4.6 Determinación de Presencia de PCB.....	45
4.4.7 Efecto a la salud y ambiente.....	47

4.5 Los PCB en transformadores .....	47
4.5.1 Tecnologías de segregación .....	49
4.6 Tecnologías para la separación y destrucción de los residuos de PCB .....	50
4.6.1 Separación (Tecnologías que implican el uso de métodos físicos): .....	53
4.6.2 Transformación (Destrucción) .....	53
4.6.3 Tecnologías basadas en métodos térmicos.....	59
4.7 Métodos de reacondicionado y recuperación de aceites aislante envejecidos en servicio .....	59
4.7.1 Reacondicionamiento .....	59
4.7.1.1 Método para la eliminación de los gases disueltos .....	59
4.7.1.2 Secado del aceite .....	61
4.7.1.3 Calefacción directa.....	62
4.7.1.4 Calentamiento realizado por medio de gases .....	62
4.7.1.5 Centrifugación:.....	62
4.7.1.7 Deshidratación por vacío.....	63
4.7.2 Recuperación.....	64
4.7.2.2 Métodos de Recuperación del Aceite con Tierra Fuller.....	65
4.8 Bases Teórico Científicas.....	74
4.8.1 Para el diseño de reactores .....	74
4.8.2 Para el diseño del calentador y deshidratador .....	77
4.8.4 Para el cálculo de bombas .....	81
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	85
5.1 Metodología .....	85
5.1.1 Tipo y Nivel de Investigación .....	85
5.1.2 Población y muestra .....	85
5.1.3 Variables .....	85
5.1.4 Diseño de la investigación .....	86
5.2 Diagnostico de la situación actual de los transformadores de distribución de la ciudad de Chiclayo .....	88
5.2.1 Recolección de datos.....	89
5.3 ETAPA 2: Diseño conceptual de elementos o partes.....	97
5.3.1 Descripción de los procesos: .....	97
5.3.2 Selección de tecnología y métodos para la recuperación del aceite dieléctrico.	

5.4	ETAPA 3: Realización de los esquemas .....	108
5.4.1	Proceso de declorinación del aceite .....	108
5.4.2	Proceso de reacondicionamiento .....	109
5.4.3	Proceso de recuperación.....	111
5.4.4	Proceso de reincorporación de aditivos.....	112
5.5	ETAPA 4: Requerimientos del diseño .....	115
5.5.1	Análisis de los equipos principales .....	115
5.5.1.1	Reactores de declorinación.....	115
5.5.1.2	Centrífuga.....	116
5.5.1.3	Calentador y deshidratador .....	116
5.5.1.4	Torres de Absorción de Tierra Fuller .....	116
5.5.1.5	Adivinación del antioxidante bajo termo vacío.....	117
<b>VI. DISEÑO INGENIERIL DE LA MAQUINA PARA TRATAMIENTO Y REUTILIZACION DE ACEITE DIELECTRICO PCB .....</b>		<b>127</b>
6.1	Dimensionamiento de los componentes de la máquina .....	129
6.1.1	Reactor (R-O1).....	129
6.1.2	Reactor (R-C2).....	152
6.1.3	Calentador .....	167
6.1.4	Filtros de tierra fuller .....	173
6.1.5	Deshidratador .....	181
6.1.6	Cálculo para la selección de las bombas de engranajes .....	188
6.2	Selección de componentes auxiliares de la máquina .....	213
6.2.1	Selección de motores de engranajes.....	214
6.2.2	Selección de la centrifugadora .....	215
6.2.3	Selección de filtros.....	216
6.3	Selección de materiales para el ensamble de la máquina:.....	217
6.3.1	Plancha de acero inoxidable para la fabricación de los reactores .....	217
6.3.2	Plancha de acero inoxidable para la fabricación del resto de componentes.....	217
6.3.3	Tuberías:.....	218
6.3.4	Unión universal:.....	219
6.3.5	Codo de 90°:.....	219
6.3.6	Unión Tee:.....	220
6.3.7	Válvula de bola .....	220

6.4 Tablero de control .....	221
VII. VIABILIDAD DEL PROYECTO .....	244
7.1 Análisis de la inversión .....	244
7.3 Análisis del servicio de regeneración de aceite dieléctrico sin PCB .....	249
7.4 Análisis del servicio de regeneración de aceite dieléctrico con PCB .....	250
VIII.- RESULTADOS .....	251
IX. CONCLUSIONES .....	252
X.- RECOMENDACIONES .....	253
XI. ANEXOS .....	254
• Especificaciones técnicas para transformadores de media tensión .....	260
• Análisis físico químico del aceite dieléctrico .....	261
• Catálogo SEW de moto reductor para R-O1 .....	263
• Catálogo SEW de moto reductor para R-O1 .....	264
• Catálogo de SEW para moto reductor de R—C2 .....	265
• Catálogo SEW de moto reductor para R- C2 .....	266
• Cotización de los filtros de 10 y 20 micras .....	279
• Tamaño de partículas .....	280
• Cotización Polietilenglicol 400 Macrogol 400 Peg-8 1 Litro .....	281
• Cotización Hidroxido De Sodio 98% 1 Kilo .....	281

## RESUMEN

En la actualidad el transformador es uno de los equipos principales con los que se cuentan para transmitir y distribuir la energía eléctrica en una red. Este equipo tiene la necesidad de refrigerarse y aislar eléctricamente sus devanados, para esto, existen diversos líquidos que poseen características que perjudican el bienestar de la persona y al medio ambiente.

Durante la evolución y desarrollo técnico-tecnológico de estos líquidos, se han creado aceites sintéticos (minerales) que son perjudiciales para medio ambiente y a su vez no son biodegradables. Inclusive los efectos de estos aceites, tengan repercusión en generaciones futuras [1].

El aceite dieléctrico en los transformadores de distribución es fundamental en su proceso de refrigeración, el estrés eléctrico, o la contaminación química, pueden producir fallas y reducir la vida útil en los equipos. Cuando estos aceites están contaminados con bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés), pueden contaminar los sistemas naturales y reducir la calidad de sus bienes y servicios ambientales [2].

Los PCB son elementos contaminantes, que son persistentes, este elemento no se encuentra en la naturaleza, han sido creados por el hombre, fueron usados desde 1930 hasta 1983 que se prohibió su producción por ser altamente dañinos para la salud. [3]

Ante la presencia de transformadores de distribución contaminados (PCB) en la Ciudad de Chiclayo se propone el diseño una máquina de bajo volumen para el tratamiento y reutilización del aceite dieléctrico contaminado (PCB).

La máquina será diseñada para realizar 3 procesos, el primero es el proceso de declorinación, el cual consiste en la eliminación selectiva de los átomos de cloro de las moléculas de PCB, luego pasará al proceso de tratamiento o regeneración, operación donde se extrae la humedad, la desgasificación y filtración de partículas y finalmente por el proceso de recuperación en donde el aceite recupera sus propiedades dieléctricas.

**PALABRAS CLAVES:** Transformadores de distribución

- Aceite dieléctrico (PCB)
- Estrés eléctrico
- Contaminación química
- Mantenimiento

## ABSTRACT

At present one of the main equipment with which are counted for the transmission and distribution of the electrical energy in a network, is the transformer. This static machine has the need to refrigerate and electrically isolate its windings, for this, have been destined various liquids that have characteristics that harm human health and the environment.

During the evolution and technical and technological development of these liquids, synthetic (mineral) oils have been created that are not environmentally friendly and in turn are not biodegradable. Even the effects of these oils, have an impact on future generations [1].

Dielectric oil in distribution transformers is key in their cooling process, electrical stress, or chemical contamination, can cause failures and reduce equipment life. When they contain or are contaminated with polychlorinated biphenyls (PCBs), they can disrupt natural systems and reduce the quality of their environmental goods and services [2].

PCBs are persistent organic pollutants that are not found naturally, they have been produced by man from 1930 to 1983 that were banned because they are highly harmful to human health. [3]

In the presence of contaminated distribution transformers (PCBs) in the city of Chiclayo, the design proposes a machine for the treatment and reuse of the dielectric oil contaminated with PCB.

The machine will be designed to perform 3 processes, the first is the process of dechlorination in which consists of the selective removal of chlorine atoms from PCB molecules, then go to the process of treatment or regeneration, operation where extracted moisture, particle degassing and filtration and finally by the recovery process where the oil recovers its dielectric properties.

### KEYWORDS:

- Distribution Transformers
- Dielectric oil (PCB)
- Electrical stress
- Chemical contamination
- Maintenance

## I. INTRODUCCIÓN

El Perú es uno de los países que forma parte del Convención de Estocolmo (2002) y teniendo conocimiento que los PCB tienen propiedades tóxicas, son bioacumulables en el medio ambiente y provocando problemas de salud y degradando el medio ambiente, se logró establecer la necesidad de retirar aquellos equipos contaminados con PCB, realizar un tratamiento y ver la disposición final hasta el 2015 y realizar la gestión ambiental de todas las existencias hasta el año 2028.

El Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo fue culminado en el año 2006 a cargo de DIGESA.

El inventario que se realizó de forma preliminar del Plan Nacional de Implementación (PIN) se estimó que en nuestro país existen en su totalidad 10 510,6 toneladas de PCB. Hasta la fecha no se pudo confirmar esta cifra, debido a que no existe una relación detallada de los equipos que se encuentran contaminados con PCB.

Los PCB fueron clasificados por la OMS en el grupo de componentes cancerígenos (International Agency for Research on Cancer, 2013), de forma que son permisibles en el ambiente, se transportan de forma que ingresa al sistema humano por el consumo de alimentos contaminados y por la exposición en el trabajo. Después de que el cuerpo humano absorba el PCB ingresara en la sangre y se almacenara en los órganos y tejidos grasos, manifestándose los primeros síntomas en la piel (cáncer de piel y clooacne).

Los PCB son persistentes es decir que permanecen en el ambiente, estos ingresan en el cuerpo a través del consumo de alimentos contaminados, por exposición directa o accidentes ambientales, a través de la piel o por las vías respiratorias. Este componente está clasificado por la OMS como parte del Grupo 1 lo que significa es que son cancerígenos. Luego de que el cuerpo humano este contaminado con PCB este circula por la corriente sanguínea y se llegan a depositar en los tejidos grasos y en órganos (pulmones, cerebro, corazón, hígado, riñón, la piel), mayormente se llega a manifestar principalmente en la piel. (International Programme on Chemical Safety, 1993) [3]).

Actualmente en la ciudad de Chiclayo se han tomado muestras de aceites dieléctricos para detectar la presencia de PCB a 130 transformadores, de los cuales 10 transformadores han dado positivo en contenido de PCB, la mayoría son transformadores monofásicos de la marca MAGNETRON del año 2000, ante esta problemática ¿Será factible diseñar un equipo para tratar el aceite dieléctrico contaminado con PCB con el fin de la reutilización en los transformadores de distribución de la ciudad de Chiclayo y así poder reducir los riesgos que representan estos residuos?.

Como medida ante el problema de contaminación que representa este aceite dieléctrico se propone el diseño de una máquina para tratamiento y reutilización, para tratar bajos volúmenes de aceite y sobre todo que pueda realizar el trabajo IN SITU, ya que algunas empresas que brindan este servicio se encuentran en Lima y resulta costoso transportar el aceite y la mayoría de empresas de Chiclayo optan por almacenar o desechar el aceite o los equipos sin previo tratamiento.

## **II. OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo general.**

- Diseñar una máquina de bajo volumen para el tratamiento y su reutilización del aceite dieléctrico (PCB) en los transformadores de distribución aéreos en la ciudad de Chiclayo.

### **2.2 Objetivos específicos.**

- Diagnosticar el estado actual de los transformadores de distribución aéreos de media tensión en la ciudad de Chiclayo.
- Evaluar y seleccionar la tecnología para la eliminación del PCB del aceite dieléctrico.
- Evaluar y seleccionar el método para el reacondicionamiento y recuperación del aceite dieléctrico.
- Diseñar la máquina para el tratamiento y reutilización del aceite dieléctrico (PCB) para bajos volúmenes.
- Análisis de la viabilidad del diseño propuesto.

### **III. JUSTIFICACIÓN**

Con esta máquina se logrará disminuir el impacto ambiental que generan los transformadores contaminados y la posibilidad de poder reutilizar el aceite dieléctrico, por lo cual la empresa se beneficiaría.

En la parte social esta máquina disminuirá los riesgos potenciales en donde las personas están expuestas de manera muy vulnerable a los PCB, dando una mejor calidad de vida y evitando posibles desarrollos de enfermedades al futuro.

En la parte económica será beneficioso para las empresas el poder reutilizar los aceites de los transformadores, por lo general los transformadores contaminados solo son almacenados y reemplazados por otros nuevos, esta máquina evitará los gastos generados por la compra de nuevos transformadores y se podrá volver a usar el transformador descontaminado con el aceite libre de PCB.

En la parte tecnológica actualmente en el mundo se venden máquinas refinadoras de aceite, que solo se trata el aceite con el fin de regenerar las propiedades de estos, estas máquinas no eliminan el PCB contenido. Hoy en día en Lima hay empresas que brindan este servicio de tratamiento de aceites dieléctricos con PCB pero no resulta factible para la empresa transportar el aceite hacia la capital.

El diseño del equipo será para bajos volúmenes de aceite y que se pueda transportar con facilidad para poder brindar el servicio.

En la parte ambiental este equipo ayudará a que se reduzca el impacto ambiental.

## IV. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Antecedentes

- **Tema:** Diseño de un sistema de reciclaje de aceite lubricante usado

**Autor:** Juan Matías Jones Pawlak

**Año:** 2007- Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

Esta tesis tiene como objetivo el reciclaje de aceite lubricante, que tiene como destino la lubricación de cadenas de transmisión y brindar servicio de purificación de aceite, factible de forma técnica y económica.

- **Tema:** Diseño y construcción de un prototipo portátil para la recuperación del aceite hidráulico usado de base mineral del laboratorio de sistemas oleoneumáticos

**Autor:** Danis Alberto Romero Villalba, Christian Adrián Meneses Suarez

**Año:** 2011- Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga

En esta tesis se llevó a cabo la investigación y el estudio sobre tribología y métodos para recuperar aceites hidráulicos deteriorados de base mineral.

Se diseñó y se construyó un prototipo usando el método mecánico para la reutilización del aceite. El método escogido es de menor impacto ambiental.

- **Tema:** Diseño y construcción de un sistema de control automático para optimizar el uso de una maquina tipo Brizzio Basi dov 4000, para tratamiento de aceite dieléctrico de transformador, para la empresa TECNIESAT.

**Autor:** Juan Pablo Aviles Arevalo

**Año:** 2011- Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca

En esta tesis se analizó el proceso de la máquina, como operaba antes de la automatización de esta. Se describió de manera general cada componente de la máquina y se diseñó el sistema de control.

- **Tema:** Re-potenciación y automatización de la purificadora de aceite dieléctrico marca Kato utilizada en la central termoeléctrica Guangopolo de la empresa CELEC Ep Termopichincha

**Autor:** Tapia Arias Christian Rafale

**Año:** 2014- Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolqui, Ecuador.

En esta tesis describe el proceso para repotenciar y automatizar la purificadora. Parte del levantamiento técnico en el cual presenta las necesidades de la máquina, proponiendo alternativas de diseño y se implementa un sistema de control basado en la automatización mediante un PLC para lograr disminuir tiempos en la operación.

- **Tema:** Análisis Técnico de la implementación del proceso de decloración, regeneración y recuperación del aceite dieléctrico contaminado con Bifenilos Policlorados.

**Autor:** Luis Diego Wachong Solano

**Año:** 2015- Universidad Rodrigo Facio, San José, Costa Rica

En esta tesis se logró establecer las características primordiales del proceso que se desea establecer en Costa Rica.

Se logró determinar que el proceso de decloración permite reducir la concentración de los bifenilos policlorados, los cuales están presentes en el aceite dieléctrico hasta que no pueda ser detectado por los métodos de medición actuales.

- **Tema:** Planta de reciclaje de aceites industriales usados

**Autor:** Bartolome Manobel Ponce

**Año:** 2015- Universidad de Sevilla, España

En esta tesis el objetivo principal es la definición de las instalaciones de tratamiento para aceites industriales usados, seleccionando la mejor tecnología con la finalidad de lograr la mejor calidad de producto. El proyecto corresponde el diseño básico de la planta de regeneración y un estudio de rentabilidad.

## 4.2 Transformadores

Los transformadores son equipos cuya función principal reducir o incrementar la tensión.

Estos equipos se encuentran desde la generación, transmisión hasta la distribución de la energía eléctrica. La labor que desempeñan es muy importante en términos económicos, por lo tanto, si ocurren fallas, se corre el riesgo de que las consecuencias sean muy graves [4].

En la Figura N° 1 se observan las partes de un transformador [4]:

1-Bobina principal se conecta a corriente alterna.

2-Bobina secundaria.

### 3- Núcleo laminado de hierro dulce.

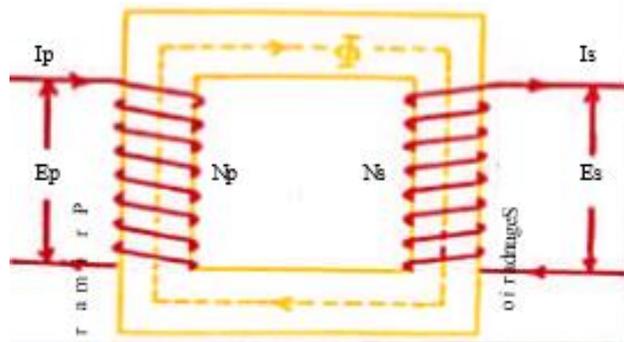


Figura 1 : Partes del transformador  
Fuente: Brettis

#### 4.2.1 Clasificación de los transformadores

Se clasifican según el modo de operación, la construcción y la utilización [5].

##### 4.2.1.1 Según el modo de operación:

- **Transformadores de distribución:** Son los transformadores reductores para líneas de consumo; pueden ser monofásicos o trifásicos, que están entre 5 a 500 kVA.
- **Transformadores de potencia:** Son los transformadores elevadores con capacidades elevadas mayores a 500 kVA, conectados después del generador en una planta eléctrica para posterior transmisión de línea de alta tensión [5].

##### 4.1.1.2 Según el número de fases:

- **Transformador monofásico:** Estos transformadores pueden ser de potencia o distribución, que se conectan a una línea de fase y a una línea neutra. Estos transformadores tienen la característica de tener un solo devanado tanto para alta y baja tensión.

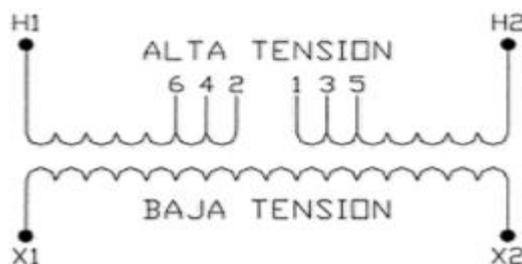


Figura 2: Esquema de un transformador monofásico  
Fuente: Transformadores de distribución, P. Avelino Pérez

- **Transformador trifásico:** Estos transformadores pueden ser de potencia o distribución, que se conectan a tres líneas y se según se requiera se conecta a una línea neutra. Estos transformadores cuentan con tres devanados tanto de alta baja tensión [5].

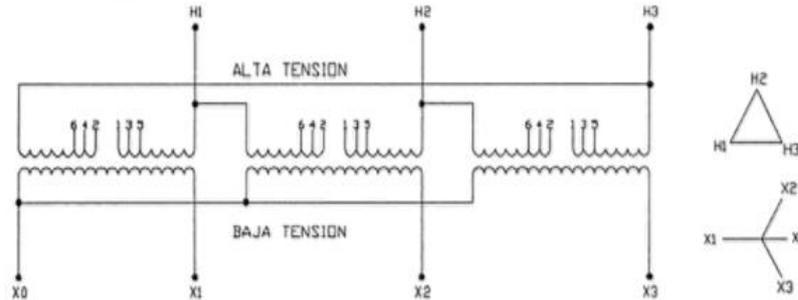


Figura 3: Esquema eléctrico, transformador trifásico  
Fuente: Transformadores de distribución, P. Avelino Pérez

#### 4.1.1.3 Según el modo de utilización:

- **Transformador para generador:** Son de tipo reductores que se conectan a la salida del generador. Este tipo de transformadores son los que habilitan de energía a la línea de transmisión.
- **Transformador para subestación:** Son de tipo reductores de potencia que están conectados al final de la línea de transmisión, con el fin de disminuir la tensión a nivel de su transmisión.
- **Transformadores de distribución:** Son de tipo reductores de tensión de sub-transmisión a nivel de consumo.
- **Transformadores de medida:** Transformadores de potencial (TP) y de corriente (TC), encargados de abastecer voltaje y corriente a equipos de protección y control.

#### 4.1.2 Componentes:

##### 4.1.2.1 El núcleo (circuito magnético)

El núcleo es la parte que compone el transformador que su función es transmitir el flujo magnético que se genera, el cual se enlaza con los circuitos eléctricos del transformador. Este núcleo se encuentra integrado por acero al silicio en láminas, enfocado a bajas pérdidas y una permeabilidad magnética alta [6].

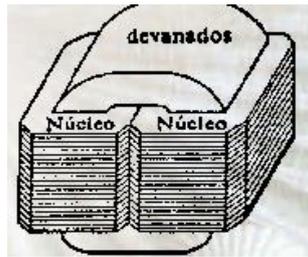


Figura 4: Núcleo  
Fuente: Brettis

#### 4.1.2.2 Los devanados (circuito eléctrico)

Según [6] la función principal de los devanados primarios es la creación de un flujo magnético para inducir en los devanados secundarios una fuerza electromotriz, y lograr transmitir energía eléctrica del primario al secundario mediante la inducción electromagnética [6].

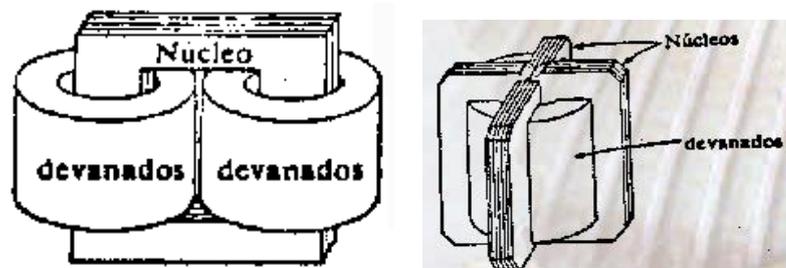


Figura 5: Devanados  
Fuente: Brettis

#### 4.1.2.3 Material Aislante

Es uno de los elementos más importantes, debido a que de este depende la vida útil del transformador, y tiene la finalidad de aislar eléctricamente los devanados, el núcleo y las partes metálicas que forman la estructura.

Algunos de los materiales que sirven como aislante son, por ejemplo: papel kraft, papel manilo, cartón prensador, barniz, porcelanas, etc. [7].

#### 4.1.2.4 Estructura y Tanque

Contiene todo el conjunto del transformador y provee protección mecánica al núcleo, devanados, y aceite mineral, protegiendo de humedad y contaminación [7].

Existen tres tipos de tanques:

- **Respiración Libre:** El aire que se encuentra sobre el aceite depositado en el fondo del tanque tiene salida a la atmósfera por una tubería de respiración. Hay mayor riesgo de desgaste del papel aislante por la humedad circundante en el tanque [7].

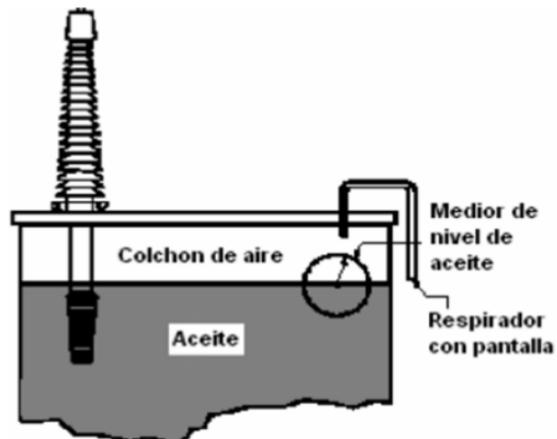


Figura 6: Transformador de tanque con respiración libre  
Fuente: C.R. Tapia Arias, 20014

- **Tanque Conservador:** Existe un tanque llamado de expansión o de conservación sobre el transformador con el fin de mantener lleno de aceite el tanque principal y evitar el contacto de la humedad con los elementos internos del mismo, así se reduce el ingreso de oxígeno [7].

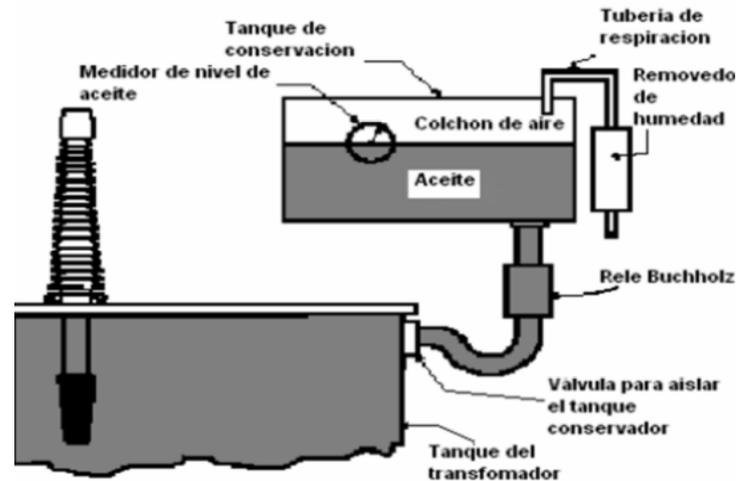


Figura 7: Tanque de tipo conservador  
Fuente: Fuente: C.R. Tapia Arias ,2014

- **Tanque Sellado:** Este tanque es similar al de respiración libre, solo que, en lugar de una tubería abierta, tiene una válvula de alivio para mantener una presión interna de +0 a -5 psi y la tapa superior no necesita pernos porque está soldada [7].

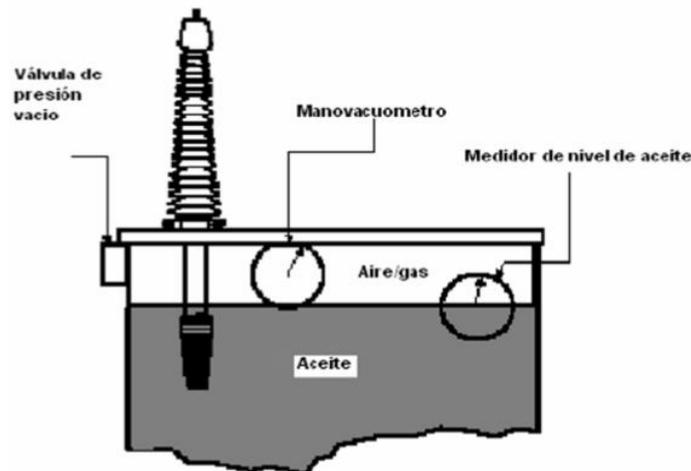


Figura 8: Tanque sellado  
Fuente: C.R. Tapia Arias ,2014

### 4.1.3 Sistema de Enfriamiento o refrigeración

Existen los transformadores sumergidos en aceite y en seco [7].

#### 4.1.3.1 Sumergidos en aceite

- **OA:** Transformador con enfriamiento natural más utilizado en la industria por su bajo costo. El aceite mineral circula por convección natural en el tanque.
- **OA/FA:** Enfriamiento por aire forzado, es el mismo sistema anterior añadido ventiladores para mejorar la disipación del calor. Esto implica una mejor eficiencia del transformador por la reducción de pérdidas por calor.
- **OA/FA/FOA:** Adicional a los ventiladores que proveen de enfriamiento por aire, la circulación forzada del aceite se logra con bombas que pueden ir conectadas a los cabezales de los mismos.
- **FOA:** Enfriamiento con aire y aceite forzado mediante la circulación a través de intercambiadores de calor exteriores.
- **OW:** Enfriamiento por agua, el mismo que se encuentra dispuesto fuera del tanque en un intercambiador de calor tubular. El agua se drena por gravedad y el aceite fluye en contacto con los tubos.
- **FOW:** Similar al FOA, solo que el enfriamiento se realiza en un intercambiador de calor modelo agua-aceite sin la necesidad de ventiladores.

#### 4.1.3.2 En seco

- **AA:** Enfriamiento propio, carece de aceite u otro fluido como aislante, el único medio aislante es el aire que rodea al núcleo y devanados.

- **AFA:** Con aire forzado mediante un ventilador que lleva el aire por un ducto hacia el núcleo y devanados.
- **AA/FA:** Enfriamiento propio y con aire forzado, control de los dos sistemas mediante un revelador térmico.

#### 4.1.4 Principales partes del transformador

Según [8] las partes más importantes del transformador que requieren de atención durante las actividades de operación y mantenimiento son las siguientes.

1. **Indicador del nivel de aceite:** Deja visualizar desde el exterior el nivel de aceite que contiene el transformador.
2. **Depósito de expansión:** Sirve cuando el volumen del aceite varía debido a la temperatura.
3. **Pasa-tapas de entrada o bujes:** La función es conectar el bobinado principal del transformador con la red eléctrica de entrada a la estación o subestación transformadora.
4. **Pasa-tapas de salida:** La función es conectar el bobinado secundario del transformador con la red eléctrica de salida a la estación o subestación transformadora.
5. **Regulador de tensión:** Permite la regulación de la tensión del transformador según las necesidades del consumo.
6. **Grifo de llenado:** Permite llenar la cuba del transformador con líquido refrigerante.
7. **Radiadores de refrigeración:** La función es disminuir el calor que se logre generar en las carcasas del transformador y evitar el calentamiento en exceso del aceite.
8. **Placa de características:** Se encuentran las características más importantes del transformador.
9. **Cuba:** Contenedor del líquido refrigerante (aceite) y en el cual se encuentran sumergidos los bobinados y el núcleo del transformador.
10. **Desecador:** La función principal es secar el aire que ingresa al equipo.
11. **Relé Bucholz:** La función principal de este relé es proteger el equipo, el reacciona cuando detecta una falla interna en el transformados.
12. **Termostato:** Medición de la temperatura interna del transformador y activa las alarmas en caso de que detecte un incremento.



Figura 9: Partes del transformador

Fuente: Procedimiento de manejo de PCB durante el mantenimiento de equipos.

#### 4.1.5 Tipos de lubricantes para transformadores

##### 4.1.5.1 Aceite Minerales

Los aceites dieléctricos que son de origen mineral se llegan a obtener a través de un derivado secundario del petróleo en donde los hidrocarburos nafténicos son los que predominan en la composición. Las propiedades que hacen que el aceite dieléctrico sea bueno no son propias de un determinado tipo de hidrocarburo, sino que presentan porcentajes entre Nafténicos, parafínicos y aromáticos. Un buen aceite dieléctrico este compuesto de aromáticos con un porcentaje de 4 a 7 %, isoparafínicos con un 45 a 55% y nafténicos de 50 a 60% [4].

##### 4.1.5.2 Aceites Sintéticos

Según [4] el uso de aceites sintéticos como aislantes eléctricos ha sido muy limitada. Últimamente se ha comenzado a usar fluidos sintéticos a base de silicona en aplicaciones especiales donde se requiera un alto grado de seguridad por un amplio tiempo de servicio.

#### 4.3 Aceite Dieléctrico (MINERAL)

El aceite mineral es resultado de la mezcla apropiada obtenida mediante procesos especializados de destilación y refinación de hidrocarburos.

El aceite cumple con 3 funciones principales internamente en el transformador (refrigerante, aislante eléctrico y protector), conservando al mismo tiempo una estabilidad buena a la oxidación y una aceptable tendencia a la gasificación [7].

Para una adecuada conducción del calor la viscosidad tiene que ser baja, ya que si esta no se controla existe un incremento en la viscosidad cinemática afectando la velocidad de movimiento en los interruptores, cambiador de derivaciones en los transformadores, bombas y reguladores. En caso de tener viscosidad alta, afecta el arranque del equipo en condiciones de clima frío. La viscosidad regula los procesos tales como deshidratación, desgasificación y filtración de los aceites [9].

El aceite mineral, debido al bajo costo, la alta resistencia dieléctrica, características esenciales para la transferencia del calor y la capacidad de recuperación después de un sobre esfuerzo dieléctrico, se considera como el material aislante por excelencia para transformadores.

Debido a que la constante dieléctrica del aceite es de 2,2 y la del sólido (pressboard, el papel crepé, papel kraft, etc.) es de 4,0; el esfuerzo dieléctrico del aceite es más alto en comparación con la de los materiales antes mencionados. Lo que influye en el diseño de la estructura limitándola al esfuerzo del aceite.

Con el uso del aislamiento directamente sobre el conductor, impide o reduce, la formación de descargas dañinas en el aceite, además, se incrementa la resistencia de la estructura.

El esfuerzo en el aceite determina la cantidad de papel necesario, al igual que las condiciones térmicas establecen el tamaño mínimo del conductor para un aislamiento adecuado [9].

#### **4.3.1 Composición de un aceite dieléctrico**

Los lubricantes dieléctricos en su mayoría están basados en aceite minerales sin aditivos y en casos severos se emplean aceites con aditivos (inhibidor de oxidación) [4].

#### **4.3.2 Aceites bases**

Estos aceites en su mayoría tienen como componentes principales a los hidrocarburos, además tienen pequeñas proporciones de los derivados del petróleo. No todos los hidrocarburos que están presentes en productos del petróleo logran realizar las funciones de un aceite dieléctrico en los transformadores e interruptores de potencia [4].

Como se dijo anteriormente los aceites dieléctricos están compuestos por una mezcla de hidrocarburos nafténicos, isoparafínicos y aromáticos. Estos diferentes tipos de hidrocarburos poseen distintas características que le proporciona al producto final, estas son [4]:

#### **4.3.2.1 Aromáticos**

- El bajo coeficiente de expansión hace que el calor no se disipe y con ello ayuda a enfriar o refrigerar, función que le corresponde al aceite dieléctrico.
- Tienen una baja estabilidad a la oxidación, por ello logra la formación estable de compuestos químicos que no presentan reacciones de oxidación, actúan de forma que capturan el oxígeno.
- Tienen bajo punto de anilina lo que significa que tiene un alto poder de solvencia frente a las lacas y resinas.
- Algunos compuestos aromáticos actúan como INHIBIDORES NATURALES de oxidación, y de tal forma, siempre es necesaria la presencia en pequeñas proporciones.

#### **4.3.2.2 Isoparafínicos**

- El punto de fluidez en los isoparafínicos es menor que en los parafínicos, haciendo que el aceite pueda fluir con facilidad a temperaturas bajas y actúe como refrigerante.
- Cuentan con una tendencia menor a la formación de gases, lo que es conveniente para la operación de los transformadores.
- La estabilidad a la oxidación es buena.

#### **4.3.2.3 Nafténicos**

- La estabilidad a la oxidación es buena
- A baja temperatura tiene una excelente fluidez
- Tiene una baja tendencia a la formación de gases y carbones ante descargas eléctricas.
- El coeficiente de expansión es aceptable.
- Alta tensión interfacial.

Cuando los aceites dieléctricos tienen una estructura balanceada de hidrocarburos, logran que el comportamiento sea bueno por un largo periodo de operación. Por otro lado, la oxidación del aceite ocurre de forma temprana en los transformadores que se encuentran operando en condiciones críticas. Para dicho equipo que se encuentran operando bajo condiciones anormales, es recomendable utilizar un aceite especial, que tenga un aditivo antioxidante. Estos aditivos son sustancias que tienen como finalidad alargar el tiempo de inducción de oxidación. El inhibidor de oxidación Di-Butil Paracresol es el más comúnmente utilizado en los aceites, de este tipo de inhibidor se

encuentran variaciones pequeñas en su composición, teniendo en cuenta su procedencia o el método que se empleó para su producción. [4].



Figura 10: Proceso de fabricación de un aceite dieléctrico

Fuente: Brettis

### 4.3.3 Propiedades

Las características físicas, químicas y eléctricas son muy importantes para que el aceite dieléctrico pueda cumplir de forma exitosa con su trabajo, las principales son [4]:

#### 4.3.3.1 Propiedades físicas:

- **Viscosidad**

Según [4] la viscosidad es la resistencia frente al desplazamiento de un fluido en una superficie sólida. Mientras el fluido tenga mayor viscosidad, mayor será la resistencia que tendrá al momento de deslizarse dentro del transformador y por lo tanto la función de refrigeración será menos efectiva. Debido a esto, los aceites dieléctricos deben contar con una baja viscosidad para poder disipar con facilidad el calor que se genera cuando el transformador este trabajando.

Tabla N°1: Viscosidades establecidas para aceites dieléctricos vs Temperatura de evaluación mediante ASTM D- 445 o D-88 [4]:

T	V
100°C	3 cSt.
40°C	12 cSt.
0°C	78 cSt.

Fuente: Brettis

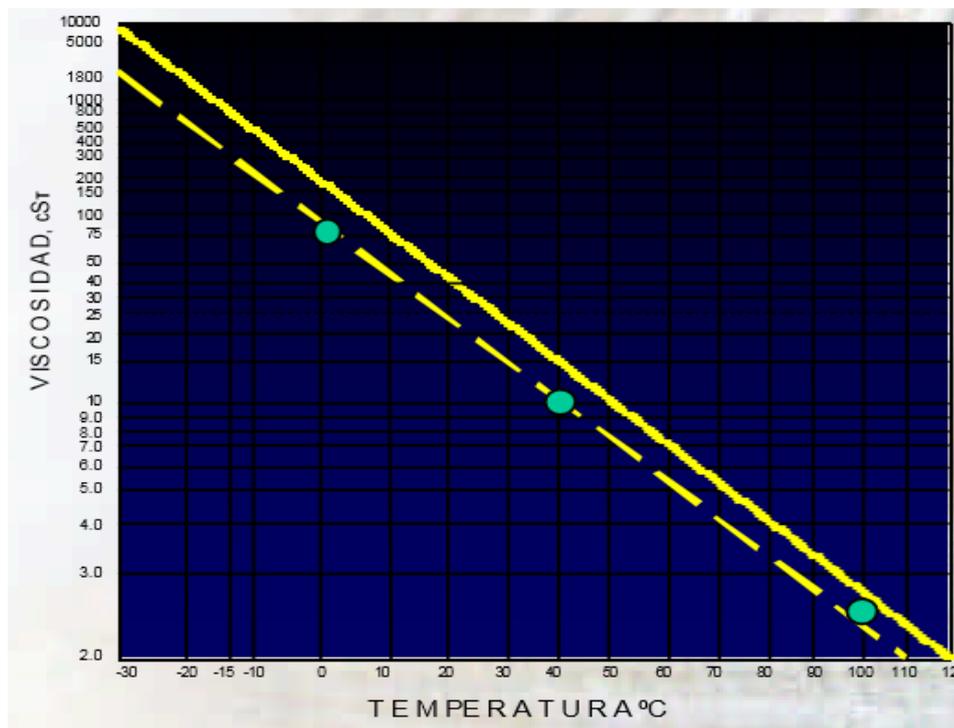


Figura 11: Curva de Viscosidad vs. Temperatura de los aceites Dieléctrico  
Fuente: Brettis

- **Punto de fluidez**

Según [4] está definido como la temperatura a la cual el aceite deja de fluir, mientras se somete a una refrigeración. Este dato sirve para identificar diferentes tipos de aceites aislantes.

- Punto de fluidez con una temperatura de 0°C o mayor a esta, presenta hidrocarburos parafínicos,
- Punto de fluidez del orden de -10°C predominan los hidrocarburos isoparafínicos.
- Punto de fluidez entre -20° a -35°C predominan los hidrocarburos nafténicos.
- Punto de fluidez con una temperatura de los -40 a -60°C presenta hidrocarburos aromáticos

Puntos de fluidez aceptables para aceites dieléctricos, evaluado mediante el método ASTM D-97, es de -40°C a -50°C.

- **Punto de inflamación**

El punto de inflamación representa a la mínima temperatura a la que el aceite genera una cantidad de vapores que permite la formación de una mezcla explosiva con el oxígeno del aire en presencia de una llama.

- Punto de inflamación con un valor mínimo es de 145°C

- **Tensión Interfacial**

La solubilidad y la viscosidad de un líquido dependen de su tensión superficial. Cuando dos líquidos son insolubles significa que tienen una tensión superficial diferente, por ejemplo, el agua y el aceite. La tensión interfacial es el constante de dos líquidos insolubles en donde sucede una interacción molecular que tiende a modificar la tensión superficial.

- La tensión interfacial con un valor mínimo de aceptación para aceites dieléctricos, evaluada por el método ASTM D-971, es de 40 dinas/cm.

- **Punto de Anilina**

Punto de anilina es la temperatura en la cual un aceite dieléctrico se llega a disolver en un volumen igual de anilina. Llega a servir como un indicador para el control de calidad, ya que un aceite dieléctrico con contenido alto de aromáticos puede disolver la anilina a menor temperatura. Las temperaturas para que ocurra la disolución de un buen aceite dieléctrico son de 78 y 86°C.

- El punto de anilina para aceites dieléctricos, evaluado por el método ASTM D-611, es de 63 a 84°C.

- **Color**

El color del aceite dieléctrico va a depender de la composición según los diferentes tipos de hidrocarburos existentes:

- Los aceites compuestos de hidrocarburos parafínicos e isoparafínicos poseen un color con aspecto transparente.
- Los aceites compuestos de hidrocarburos nafténicos poseen un color amarillo claro a amarillo verdoso.
- Los aceites compuestos de hidrocarburos aromáticos poseen un color amarillo rojizo (naranja) hasta marrón oscuro.

- El color se evalúa mediante el método ASTM D- 1500, con un color máximo de 0,5 (amarillo claro)

#### 4.3.3.2 *Propiedades Eléctricas*

- **Factor de Potencia**

Con factor de potencia se logra medir las pérdidas de corriente que ocurren dentro del equipo cuando está en modo de operación. La existencia de compuestos polares en el aceite es lo que generan estas pérdidas de y a su vez son causantes de aumentos anormales de temperatura que suceden en los equipos bajo carga.

Tabla N° 2: Factor de potencia máximo permisible (%), ASTM D-924, es [4]:

T°	%
25°C	0,05
100°C	0,3

Fuente: Brettis

- **Rigidez dieléctrica**

Según [4] la rigidez dieléctrica de un aceite es el mínimo voltaje en el que un arco eléctrico ocurre entre dos electrodos metálicos. Indica la capacidad que tiene el aceite para poder soportar tensiones eléctricas sin falla.

Cuando el aceite contiene agua, carbón u otros contaminantes provoca una baja resistencia dieléctrica. La mejor forma para saber si el aceite tiene contaminantes o no, es verificar la rigidez dieléctrica, una alta resistencia dieléctrica indica que no hay contaminantes.

#### 4.3.3.3 *Propiedades químicas:*

- **Estabilidad a la oxidación**

Los aceites dieléctricos llegan a estar expuestos a altas temperaturas, presencia de aire y metales catalizadores como hierro y cobre, lo cual hace que el aceite llegue a tener cambios químicos produciendo la formación de lodos y ácidos, atacando el tanque y reduciendo la capacidad aislante como consecuencia se tiene pérdidas eléctricas.

Resulta de mucha importancia la eliminación de ácidos y lodos debido a que perjudican al aceite dieléctrico. Debido a esto es muy esencial utilizar aceites refinados con una óptima estabilidad química y resistencia a la oxidación que logren garantizar su funcionamiento por un largo periodo de tiempo.

#### 4.3.4 Factores que deterioran el estado del aceite

Enunciaremos los principales elementos que perjudican el estado del aceite [10]:

- **Temperatura:** Influye en el deterioro del aceite mineral.

El aumento de 8 °C por encima de los 60 °C, reduce un tercio la vida media del aislamiento líquido. Se tiene que tener mucho cuidado con la temperatura debido a que es un factor de mucha importancia.

- **Agua:** El agua se puede encontrar de forma disuelta o en gotas, esto es consecuencia del mantenimiento inapropiado del aceite.

El efecto de este factor disminuye la rigidez dieléctrica del aceite, afecta a la tangente del ángulo de pérdidas (aumentando su valor) y, además, se llega a incrementar la velocidad con la que se degrada los aislantes.

- **Gases disueltos:** El oxígeno es el principal elemento responsable de reducir las propiedades del aceite dieléctrico, debido a que un contenido alto logra acelerar el envejecimiento del aceite, en otras palabras, provoca la oxidación.
- **Productos iónicos y polares:** Este tipo de contaminante se encuentran presentes en el aceite producto de la degradación del aceite, barnices, y pinturas que se encuentran dentro del transformador, introducción de aislante contaminado. Las propiedades eléctricas del aceite son principalmente afectadas, pérdida de aislamiento.
- **Partículas:** Este tipo de contaminantes se originan por el transporte y el proceso de manufactura de los transformadores. Las partículas que predominan en su mayoría son los óxidos metálicos y metales (hierro y cobre), también metales disueltos (el zinc, níquel, vanadio, sodio). El aceite tiende a envejecer debido a que estas partículas llegan a catalizar la reacción de oxidación. Las impurezas se dan como partículas, fibras no metálicas de la celulosa, que provienen del papel del transformador o de la madera.

Las partículas de materia no mayores a 5µm (micrómetros) de tamaño es el límite permitido de que los aceites pueden contener.

Este tipo de impurezas disminuye la rigidez dieléctrica de forma considerable.

- **Estrés eléctrico:** Cuando el aceite está sometido a campos eléctricos intensos tiene como resultado su deterioro.
- **PCB's:** Los bifenilos policlorados son considerado un contaminante prohibido. Debido a que es tóxico y bioacumulables, provocando dejar de usar productos contaminados con PCB. Un transformador en buen estado debe estar completamente libre de PCB.

### 4.3.5 Envejecimiento del aceite mineral aislante.

El envejecimiento de un aceite mineral es el compendio de todos los procesos físicos y químicos que, durante el desarrollo de las funciones aislantes y refrigerantes del mismo en el seno del transformador, conducen a modificaciones significativas de las propiedades iniciales de dicho aceite. En última instancia, prácticamente todas estas modificaciones son el resultado de un proceso de oxidación que experimenta el aceite a lo largo de los años de servicio [10].

#### 4.3.5.1 Proceso de oxidación

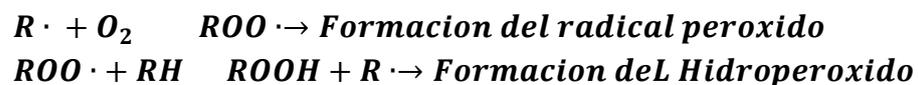
Los hidrocarburos son las moléculas que constituyen la estructura química de los aceites. Estas moléculas son sensibles a la reacción con el oxígeno provocando una como auto-oxidación, a continuación, se describen cada una de las etapas [10]:

- **Iniciación:** Se produce por descomposición de los hidrocarburos por efecto de la temperatura, de la luz o por catálisis metálica. Debido a esto, se forma un radical libre a partir de las moléculas de hidrocarburo:



La formación de radical peróxido es el paso principal donde se consume oxígeno, a partir del cual, por reagrupar intermolecular o por posterior reacción, se forman todos los productos de oxidación.

- **Propagación:** Cuando el producto procedente de un radical simple reacciona para formar dos radicales, se produce la ramificación en cadena y la velocidad de reacción aumenta. Como los hidroperóxidos no sólo son indicadores sino también productos, la mayor parte de la auto-oxidación son auto-catalizadas.

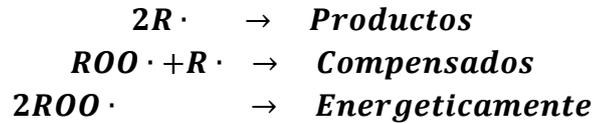


- **Ramificación:**



- **Terminación:** Esta etapa implica el acoplamiento de radicales alquilperóxido y de radicales alquílicos, bien sea entre sí o con otros radicales, desde el punto de vista de la oxidación se produce moléculas no activas, decreciendo, por

tanto, el número de radicales libres. La terminación, por tanto, disminuye o para la reacción.



#### 4.3.5.2 Productos formados durante el proceso de oxidación:

Los hidroperóxidos, formados en las primeras etapas de la oxidación, pueden evolucionar por varios caminos reactivos distintos para formar especies químicas más estables. Las principales especies formadas y los problemas que plantean son [10]:

- **Ácidos carboxílicos:** Proporcionan al aceite un grado de corrosividad que depende de la naturaleza de los ácidos formados. Provocando daños en los elementos que se encuentran sumergidos en el aceite. Como consecuencia disminuye la resistencia mecánica de los aislamientos celulósicos.
- **Agua:** Acelera la corrosión de los metales y de los materiales aislantes presentes. Además, degrada seriamente las propiedades dieléctricas del aceite y de los otros aislantes del transformador debido a su alta polaridad.
- **Sales** (Esteres y sales metálicas de ácidos orgánicos): Afectan seriamente a las propiedades dieléctricas del aceite y de los aislantes impregnados de aceite, incrementando la tendencia a formar emulsiones.

La presencia de ciertas sales metálicas, de limitada solubilidad, provocan la oclusión de los conductos de refrigeración y el recubrimiento de las superficies metálicas de intercambio térmico de los transformadores, lo que impide en gran medida la disipación de calor.

- **Gases:** Provocan descargas parciales y ruptura dieléctrica si se concentran en las áreas de mayor sollicitación eléctrica del transformador. Fundamentalmente son hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos de uno a tres átomos de carbono.

- **Lodos:** Son los últimos productos de la oxidación y son insolubles. Se depositan en las partes más calientes (núcleo, arrollamientos). Se llegan a depositar alrededor de los conductos de aceite de los radiadores. Como consecuencia disminuye la capacidad de refrigeración y aumenta considerablemente el valor de la tangente del ángulo de pérdidas.



Figura 12: Curva de oxidación de un aceite dieléctrico  
Fuente: Brettis

#### 4.3.5.3 Proceso de degradación de los aceites dieléctricos

Según [4] para que ocurra el proceso de oxidación en los aceites va a depender de diversos factores:

- Composición del aceite.
- La cantidad de oxígeno requerido para que puedan ocurrir la reacción oxidación.
- La presencia del agua y otros catalizadores de oxidación, tales como partes de cobre.
- La temperatura del aceite dieléctrico durante el su tiempo de operación.

El oxígeno proveniente para las reacciones de oxidación en encuentran en:

- El aire que comúnmente está disuelto en el aceite dieléctrico.
- La electrólisis del agua presente en el transformador .

Cuando el oxígeno que se encuentra en el aceite es muy elevado, la reacción de oxidación es más frecuentes y son más completas. Otros catalizadores de las reacciones de oxidación que afectan al aceite son el hierro, el cobre y cualquier otro metal en contacto.

El nivel de temperatura a la cual el equipo opera es un factor muy importante en la velocidad de oxidación del aceite dieléctrico y a mayor temperatura, degradación del aceite ocurrirá de forma rápida en la tabla siguiente se observa la variación de los años del aceite: [4].

Tabla N°3: Número de neutralización vs Temperatura

TEMPERATURA DE OPERACION DEL EQUIPO	VIDA UTIL DEL ACEITE DIELECTRICO EN AÑOS
60°c	20,00
70°C	10,00
80°C	5,00
90°C	2,50
100°C	1,25
110°C	7 meses

Fuente: Brettis

#### 4.3.6 Pruebas de Evaluación del Aceite Dieléctrico

Para un correcto programa de mantenimiento, es muy importante las pruebas de diagnósticos que se le realizan al aceite dieléctrico, dichas pruebas tienen que realizarse una vez al año, con el fin de evitar fallas a tiempo [11]:

##### 4.3.6.1 Rigidez dieléctrica

En esta prueba se detecta la presencia de agente contaminante como el agua, polvo, partículas conductoras contenidas en el aceite. Cuando en una prueba de rigidez se obtienen valores bajos significa que el aceite se encuentra contaminado, disminuyendo el aislamiento del transformador.

En esta prueba se aplica un voltaje de corriente alterna. Entre dos electrodos sumergidos en aceite a una distancia de 2,0 mm o 2,54 mm dependiendo de la norma a ser utilizada.

La rigidez dieléctrica es el valor de la tensión en kilovoltios a la que se presenta una descarga entre los electrodos. Por norma general es el promedio de 5 pruebas sobre la misma muestra.

Las normas utilizadas y los valores límites permitidos para esta prueba son las siguientes:

- ASTM D-877: Electrodos planos separados 2,54 mm, Tensión Mínima 25 kV
- ASTM D-1816: Electrodos semiesféricos separados 2,0mm, Tensión mínima 50 kV.

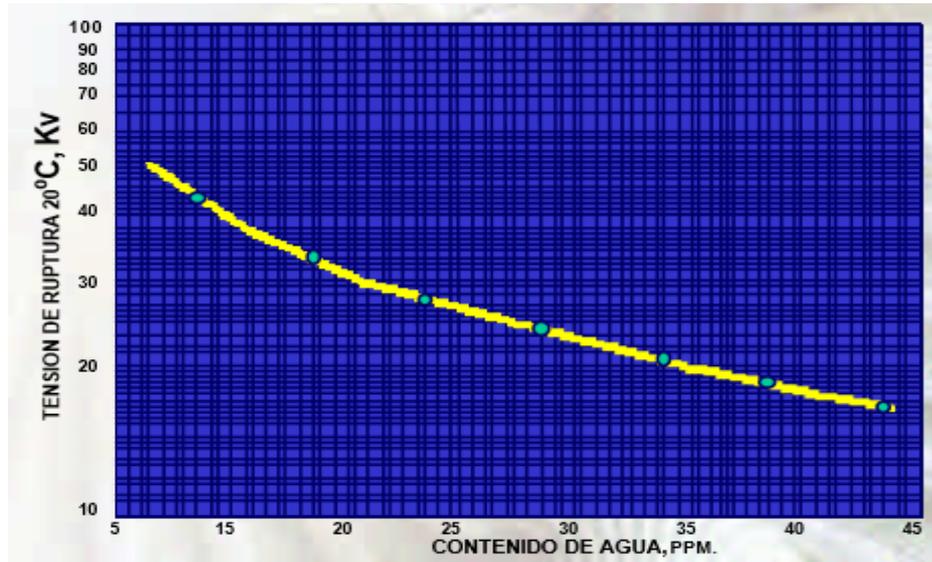


Figura 13: Temperatura de rotura vs contenido de agua  
Fuente: Brettis

#### 4.3.6.2 Numero de Neutralización, Normas ASTM D-664 Y ASTM D-974

Esta prueba mide la proporción de ácidos que se fueron formando a través del tiempo de operación en el aceite dieléctrico.

Como resultado del envejecimiento por oxidación el valor aumenta y esto sirve como guía para establecer el momento para reemplazar o regenerar dicho aceite [4].

El número de neutralización de un aceite nuevo no debe exceder 0,025 mg KOH/g. Aceites con valores de orden de 0,5 mg KOH/g no es aceptable para el servicio [4].

La presencia de lodos indica que el aceite tiene una alta acidez, y que implica que los ductos de refrigeración se encuentren obstruidos y por lo tanto la capacidad de potencia disminuya. [11].

Tabla N°4: Valores para la prueba de neutralización de aceites.

<b>Estado del aceite: Nuevo</b>	0,03 mg KOH/gr
<b>Estado del aceite: Usado</b>	Entre 0,1 y 0,2 mg KOH/gr
<b>Estado del aceite: Regenerar</b>	Mayor a 0,2 mg KOH/gr

Fuente: Aspectos generales de pruebas de aceite transformadores de potencia, C. Alvarado

#### 4.3.6.3 Tensión Interfacial, Norma ASTM D-971

La tensión interfacial se emplea para poder hallar productos de oxidación, que no se pudieron detectar con la prueba de acidez, por tal motivo esta prueba complementa a la anterior.

Hay dos métodos existentes para poder calcular la tensión interfacial del aceite dieléctrico.

- El método de la Norma ASTM D-971 (método del anillo), para poder calcular la tensión entre el aceite y el agua destilada.
- El método de la norma ASTM D 2285 calcula la tensión interfacial de las gotas de agua que están suspendidas desde una aguja sumergida en la muestra del aceite [12].

Tabla N°5: Valores mínimos permitidos para la tensión interfacial.

<b>Estado del aceite: Nuevo</b>	45 dinas/cm
<b>Estado del aceite: Usado</b>	45 dinas/cm
<b>Agua destilada</b>	70 dinas/cm

Fuente: Aspectos generales de pruebas de aceite transformadores de potencia, C. Alvarado

#### 4.3.6.4 Contenido de humedad, Norma ASTM D-1533

El contenido de humedad logra determinar la cantidad de agua (ppm) contenida en el aceite dieléctrico [11].

Tabla N° 6: Valores permitidos máximos del aceite.

<b>Estado del aceite: nuevo</b>	10 ppm
<b>Estado del aceite: usado</b>	30 ppm

Fuente: Aspectos generales de pruebas de aceite transformadores de potencia, C. Alvarado

- Curva A: Saturación en contenido de agua de un aceite nuevo.
- Curva B: Saturación en contenido de agua en un aceite oxidado con un índice de neutralización de 0,3 mg KOH/g.

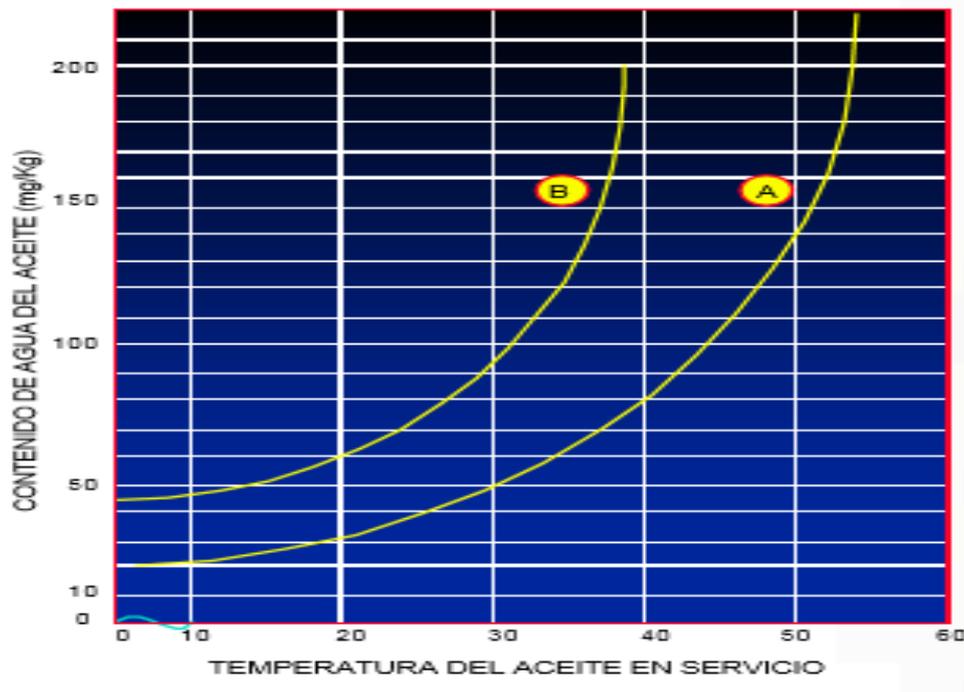


Figura 14: Temperatura vs Contenido de agua  
Fuente: Brettis

Según [4] el diagrama se interpreta que, para una temperatura establecida, el aceite puede disolver una determinada cantidad de agua, dependiendo del punto de equilibrio. Cuando el agua contenida llega a sobrepasar nivel de valor de saturación, no permanece en solución, y se expresa en forma de turbulencia o de gotas ocasionando una baja rigidez dieléctrica.

#### 4.3.6.5 Índice colorimétrico (color), Norma ASTM D-1500

El tono de color de un aceite dieléctrico está definido por la luz transmitida y se expresa por un número que se obtiene al comparar una serie de colores que ya están estandarizados. Cuando ocurre una variación en el tono de color del aceite es señal de contaminación o el deterioro [4].

Tabla N° 7: Los valores típicos de color.

<b>Estado del aceite: nuevo</b>	0,5
<b>Estado del aceite: usado</b>	1,5

Fuente: Aspectos generales de pruebas de aceite transformadores de potencia, C. Alvarado

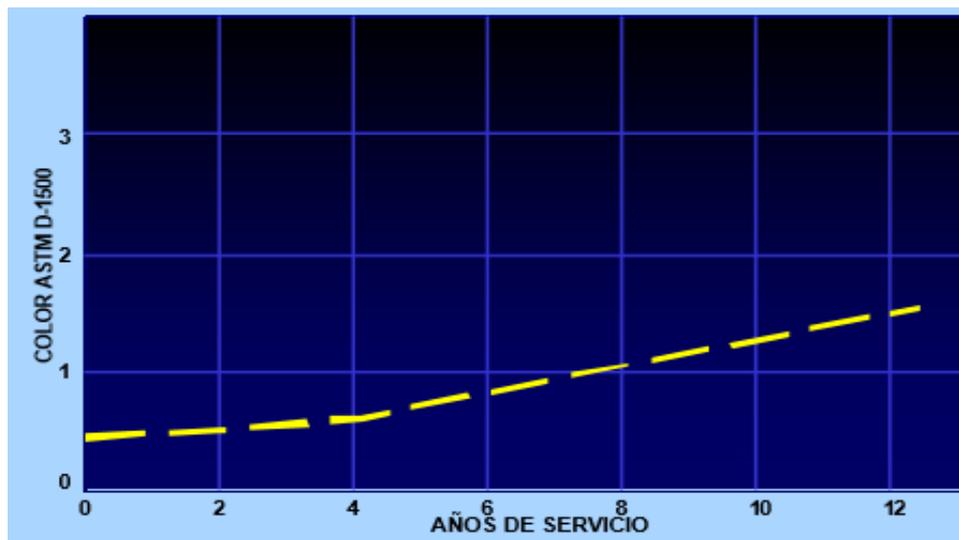


Figura 15: Curva de color vs años de servicio

Fuente: Aspectos generales de pruebas de aceite transformadores de potencia, C. Alvarado

#### 4.3.6.6 Cromatografía de gases disueltos, Norma ASTM D-3621

Consiste en el análisis de los tipos que gases que se encuentran diluidos en el aceite dieléctrico.

Los gases se producen dentro del transformador y se llegan a disolver en el aceite, por diversos motivos, como las elevadas temperaturas, humedad, descargas parciales, arcos eléctricos, etc.

La cromatografía de gases es un equipo que se emplea para la realización de este análisis, se calienta una muestra de aceite y se extraen los gases, se separan y se cuantifica en partes por millón [11].

A continuación, se muestra la tabla N° 8 sobre los gases más comunes en un transformador [12]:

Tabla N° 8: Análisis de gases disueltos en el aceite dieléctrico (PPM)

Gases Generados	Normal	Precaución	Advertencia	Diagnóstico de Falla
Hidrógeno H <sub>2</sub>	<100	100-700	>700	Descargas parciales
Metano(CH <sub>4</sub> )	<120	120-400	>400	Puntos Calientes
Acetileno(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	<2	2-5	>5	Arcos en Aceite
Etileno(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	<50	50-100	>100	Sobrecalentamiento del Aceite
Etano(C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	<65	65-100	>100	Baja intensidad de descarga

Oxido de Carbono (CO)	<350	350-570	>570	La celulosa se llega a sobrecalentar
Total de Gases	<700	700-1900	>1900	Descomposición del sistema de aislamiento

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos, M.G. Briones Martínez.

#### 4.3.6.7 Densidad relativa

Según [12] la densidad relativa es una propiedad física de los aceites dieléctricos, está definida por la relación que hay entre la masa de aceite y la masa del mismo volumen de agua a la misma temperatura. Para que se pueda llevar a cabo esta prueba el aceite se coloca en un cilindro en donde se introduce un hidrómetro que se hunde de forma parcial en el aceite. La superficie del aceite cruza el hidrómetro en una de sus divisiones marcadas indicando así el valor de la densidad relativa del aceite.

Cuando se tiene resultados con valores que exceden a 0,91 existe una probabilidad de que el aceite contenga Bifenilos Policlorados.

Tabla N° 9: Valores de densidad relativa.

Aceptable	Cuestionable	Inaceptable
0,84 a 0,91	<0,84	>0,91

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos, M.G. Briones Martínez.

#### 4.3.6.8 Contenido de inhibidor ASTM D-4768

La función de los inhibidores son retrasar el proceso de oxidación del aceite de transformador los más comunes son El 2,6. ditercio-butil para-cresol (DBPC) y el 2,6-ditercio—butil fenol (DBP). Cuando el contenido de oxígeno en el aceite supera los 1000 ppm se recomienda el uso de estos inhibidores.

Cuando hay un frecuente consumo de inhibidor esto representa que el aceite dieléctrico tiene la necesidad de un mantenimiento.

Para poder realizar esta prueba existen dos métodos que detectan ambos compuestos el DBCP Y el DBP.

- Norma ASTM D2668 utiliza un espectrofotómetro infrarrojo.
- Norma ASTM D 4768 utiliza la cromatografía de gases.

Los resultados de ambos métodos son similares y el contenido de inhibidor de oxidación está representado como porcentaje de peso del total de inhibidor del aceite dieléctrico.

El nivel óptimo para el inhibidor de oxidación es de 0,3% en el aceite [12].

Tabla N° 10: Contenido de inhibidor de oxidación.

<b>Aceptable</b>	<b>Cuestionable</b>	<b>Inaceptable</b>
≥0,2 %	≥0,1% <0,2%	<0,1%

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos, M.G. Briones Martínez.

Tabla N° 11: Pruebas ASTM más importantes para aceites aislantes en operación.

<b>Método de Prueba</b>	<b>Parámetros de prueba</b>	<b>Tipo de contaminación.</b>	<b>Acción a Tomar resultados inaceptables)</b>
Rigidez Dieléctrica ASTM D-877 (Kv)	Admisible ≥ 30 Discutible: 25-30 Inadmisible : < 25	- Impureza - Agua	El aceite se filtra y se deshidrata al vacío.
Número de Neutralización ASTM D-974 (mg KOH/g)	Admisible: ≤ 0,05 Discutible: 0,05-0,1 Inadmisible : > 0,1	- Ácidos - Lodos	Filtrado de aceite con tierra fuller.
Tensión Interfacial ASTM D-971	Admisible: ≥ 32 Discutible: 28-32 Inadmisible : < 28	- Polares ácidos	
Color ASTM D-1500	Admisible: ≤ 3,5 Inadmisible: >3,5	Cambio marcado en un año indica anomalía	
Contenido de Agua ASTM D-1533 (ppm)	Admisible: < 30 Discutible: 30-35 Inadmisible: ≥ 35	- Agua	El aceite se deshidrata al vacío.
Densidad Relativa ASTM D-1298	Admisible: 0,84 – 0,91 Discutible: < 0,84 Inadmisible: >0,91	Necesidad de revisar contaminantes	Investigar
Contenido de Inhibidor ASTM D-4768	Admisible: ≥ 0,2% Discutible: 0,1-0,2 % Inadmisible : < 0,1%	Nivel de defensa contra productos de oxidación	Se le agrega inhibidor al aceite.
Factor de Potencia a 100°C ASTM D-924	Admisible: < 3% Discutible: 3-4% Inadmisible: > 4%	- Agua, ácidos - Contaminantes extraños.	El aceite entra a mantenimiento completo.

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos, M.G. Briones Martínez.

## **4.4 Bifenilos Policlorados (PCB)**

### **4.4.1 Introducción**

Desde que fueron sintetizados a mediados del siglo XIX los PCB han contribuido en gran forma al desarrollo tecnológico de los equipos eléctricos al aprovechar sus inmejorables características técnicas, por lo que su producción fue en aumento constante a partir de su industrialización en 1929 debido a la gran demanda en numerosos tipos de aplicaciones en la industria, sin embargo a partir de los exámenes y evidencias surgidas en los años setenta también se reconocieron los graves efectos a la salud humana y al ambiente que ocasionan estos compuestos, por lo que se hizo necesario a partir de entonces su ubicación e identificación para proyectar una gestión y manejo ambientalmente seguro.

Los Bifenilos Policlorados (PCB) conforman una clase o familia de sustancias químicas que pertenecen al grupo de los hidrocarburos aromáticos clorados, los mismos que por sus propiedades físicas y químicas como material aislante, refrigerante, piroresistente, fueron muy utilizados en diversas aplicaciones industriales que aún se mantienen en la actualidad y que se hace necesario ubicarlas e identificarlas para garantizar su manejo hasta su disposición final segura.

La aplicación industrial de los PCB más utilizada a nivel mundial es en los aceites dieléctricos contenidos en los transformadores eléctricos y en los capacitores o condensadores. También encontramos este fluido en aplicaciones parcialmente cerradas y abiertas, las que son más difíciles de identificar y que se mantengan en sus compartimientos originales debido justamente a esta condición que les permite entrar en contacto con el ambiente con mayor o menor facilidad.

Los Bifenilos Policlorados (PCB) junto con las dioxinas y foranos y nueve plaguicidas organoclorados conforman la lista de los Contaminantes Orgánicos Persistentes - COP, los mismos que por sus características de persistencia y acumulación se encuentran en casi todos los compartimientos ambientales (aire, agua, suelo y alimentos), por lo que se encuentran dentro de los alcances del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes-COP, instrumento internacional vinculante que regula la gestión de dichos compuestos hasta su eliminación y disposición final en el 2025 (para el caso de los PCB).

Es por esto que resulta muy importante conocer las existencias, equipos y residuos contaminados con PCB y sobre todo definir el problema y su distribución a fin de establecer el futuro plan de acción a desarrollar sustentado en datos confiables obtenidos del proceso de Inventario. Está comprobada la toxicidad de los PCB en la salud humana, proporcionalmente al grado de exposición, sobre todo a nivel ocupacional y por el consumo de alimentos contaminados [13].

#### 4.4.2 Marco Legal del Manejo de PCB en el Perú

El manejo de los Bifenilos Policlorados (PCB), desde la generación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento, hasta su disposición final o eliminación se sustenta en la siguiente normatividad directamente relacionada [13]:

- **Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos (10.07.2000)**

Constituye el marco legal para el manejo de los residuos sólidos, no peligrosos y peligrosos, dentro de los cuales están incluidos los PCB. En esta norma no se involucran los residuos líquidos, que se contemplan recién con la promulgación del Reglamento respectivo.

- **D.S. N° 057-2004-PCM, Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos (22.07.2004)**

En este reglamento se incluyen en la Novena Disposición Complementaria, Transitoria y Final, los desechos de aceites y solventes industriales a fin de que estos residuos líquidos peligrosos, mientras no se promulgue una norma específica, se sometan a las disposiciones de la Ley para su manejo ambiental y seguro, a través de empresas registradas (EPS-RS ó EC-RS) y autorizadas por la DIGESA para el tratamiento y disposición final de PCB. Específicamente los desechos contaminados con PCB se contemplan en su Anexo 4 Lista A: Residuos Peligrosos, 3.18: “Los residuos y artículos que contienen, consisten o están contaminados con bifenilo policlorado (PCB), terfenilo policlorado (PCT), naftaleno policlorado (PCN) o bifenilo polibromado (PBB), o cualquier otro compuesto polibromado análogo, con una concentración superior a 50 mg/kg”.

- **D.S. N° 016-93-EM, Reglamento para la protección ambiental en la actividad minero - metalúrgica. (01.05.93).**

El Anexo N° 1 es el INFORME SOBRE GENERACION DE EMISIONES Y/O VERTIMIENTOS DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA MINERO-METALURGICA, en el cual hay un acápite específico para declarar los residuos industriales con contenido de PCB y detalles de su disposición final.

- **Decreto Supremo N°29-94-EM, Reglamento de Protección Ambiental de las Actividades Eléctricas.**

El Anexo N° 2 es un INFORME SOBRE LA GENERACIÓN DE EMISIONES Y VERTIMIENTOS DE RESIDUOS DE LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA. En la lista adjunta al Anexo N° 2 referida a los residuos industriales obligados a ser declarados, se señalan los que contengan PCB, debiéndose informar sobre la cantidad y otras características además de indicar que disposición final se le dio.

- **Resolución Legislativa N° 26234**

Aprueba el Convenio de Basilea sobre el movimiento transfronterizo de desechos peligrosos. (19.10.93), por el cual se adoptan las medidas para el adecuado intercambio de información sobre los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y el adecuado control de tales movimientos. Art. 11, 41, 61 y 131; Anexo: I, II, IV.

- **Ley N° 28611, Ley General del Ambiente. (15.10.2005)**

El cual dispone que las instalaciones destinadas a la fabricación, procesamiento o almacenamiento de sustancias químicas peligrosas o explosivas deban ubicarse en zonas industriales, conforme a los criterios de la zonificación aprobada por los gobiernos locales. Art. 23° (23,3). También se incluyen disposiciones para el control de sustancias químicas. Art. 83° (83,1, 83,2) y se establece la responsabilidad del generador sobre el manejo de los residuos peligrosos.

- **Ley N° 28256, Ley para el Transporte de Materiales y Residuos Peligrosos (19.06.2004).**

Promulga las disposiciones generales para el transporte de residuos peligrosos y por lo tanto aplicables a los residuos de PCB. Sin embargo, está pendiente la dación de su Reglamento con el detalle de los procedimientos, autorizaciones y competencias inherentes al transporte de los mismos.

- **D.S.N° 067-2005-RE (10.08.05)**

Ratificación del Convenio de Estocolmo por parte de nuestro país. Mediante este documento se establece el compromiso del Perú para cumplir con las disposiciones del Convenio de Estocolmo, el mismo que se convierte en un instrumento jurídico vinculante de carácter supranacional.

#### **4.3.3 Historia y antecedentes**

Los Bifenilos Policlorados (PCB) fueron descubiertos al final del siglo XIX. Se usa de forma comercial desde 1930 como fluidos dieléctricos e intercambiadores de calor y en diferentes aplicaciones. Los PCB son persistentes y se acumulan en la cadena alimentaria por ende están distribuidos en el ambiente de todo el mundo.

Los humanos se encuentran expuestos a los PCB debido al consumo de alimentos contaminados, por la inhalación y absorción por medio de la piel en centros de trabajo.

Los PCB se llegan a acumular en el tejido adiposo de las personas y animales, causando enfermedad, en el caso de exposiciones repetidas. La patología se manifiesta sobre todo en la piel y el hígado, también están expuestos el sistema nervioso y el sistema inmunitario [13].

Los dibenzofuranos policlorados (DFPCs), están presentes como contaminantes en mezclas comerciales de PCB, haciéndolos más tóxicos. Se realizó unos estudios en roedores donde los resultados demuestran que algunos compuestos semejantes a los PCB pueden desarrollar el cáncer [13].

#### **4.4.4 Producción y uso**

Los principales usos son en equipos eléctricos y en volúmenes reducidos como líquido pirorresistente en sistemas de régimen cerrado.

Al principio de 1990, la producción mundial total de PCB superó el millón de toneladas y desde entonces, se ha seguido produciendo en algunos países.

A pesar de las restricciones que fueron establecidas sobre la producción y creciente retirada del uso, en el ambiente sigue existiendo una gran cantidad de estos compuestos, bien en uso o como desecho.

En transcurso de los últimos años, la mayoría de países industrializados adoptaron medidas para el control y limitar el flujo de PCB hacia el ambiente. El factor decisivo que ha llevado a estas restricciones ha sido probablemente una recomendación de 1973 de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) (OMS, 1976; CIIC, 1978; OCDE, 1982). Desde ese entonces, los 24 países miembros de la OCDE limitaron la producción, la venta, la importación, la exportación y el uso de PCB, además de establecer un sistema de identificación y etiquetado de estos productos.

Las principales fuentes que liberan PCB están la volatilización de vertederos (rellenos sanitarios y botaderos) que contienen equipos contaminados con PCB en zonas abiertas. Cuando se incineran desechos contaminados con PCB y no son eficaces en su totalidad, se libera el contaminante hacia el entorno.

Los PCB se pueden convertir en dibenzo furanos policlorados (DFPCs) en condiciones pirolíticas. En las condiciones de laboratorio, la máxima producción de DFPCs se obtuvo a temperaturas entre 550°C y 700°C. Así pues, la mala operación de la combustión de PCB puede ser una importante fuente de los peligrosos DFPCs. Por lo tanto, se recomienda un cuidadoso control y una correcta operación en la destrucción de desechos contaminados con PCB, especialmente en relación con la temperatura de combustión (por encima de los 1 000°C), el tiempo de permanencia y la turbulencia.

A continuación, se describe tipos de sistemas y aplicaciones en donde se pueda encontrar PCB:

Tabla N° 12: Sistema, aplicación, localización y posibles usos de mezclas de PCB

Sistema	Descripción	Ubicación	Uso
Cerrado	Son sistemas completamente sellados, donde los PCB se encuentran en el interior del equipo. Este contaminante se libera cuando al equipo se le realizan mantenimientos o sufren daños.	<b>Instalaciones eléctricas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformadores.</li> <li>- Capacitores grandes.</li> <li>- Reguladores de voltaje.</li> <li>- Disyuntores.</li> <li>- Condensadores.</li> <li>- Reactores de potencia.</li> </ul>
		<b>Instalaciones industriales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformadores.</li> <li>- Capacitores grandes.</li> <li>- Reguladores de tensión.</li> <li>- Disyuntores.</li> <li>- Lámparas fluorescentes</li> </ul>
Parcialmente Cerrado	En este tipo de sistemas los PCB no están expuestos al ambiente y por motivos de falla pueden ser liberados al exterior,	<b>Instalaciones eléctricas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interruptores.</li> <li>- Reguladores de voltaje.</li> <li>- Cables con recubrimiento en el núcleo.</li> </ul>
		<b>Instalaciones industriales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquido para transmisión de calor,</li> <li>- Fluido hidráulico,</li> <li>- Fluido para sistema de vacío.</li> <li>- Sistema de extinción de incendios.</li> </ul>
Abierto	En este tipo de sistemas, los PCB hacen parte de otros productos que se encuentran fácilmente en contacto con el ambiente y, por ende, con el ser humano.	<b>Lubricación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aceite refrigerante.</li> <li>- Aceite de inmersión.</li> <li>- Aceite lubricación.</li> </ul>
		<b>Recubrimientos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de polvo en líneas de conducción de gas.</li> <li>- Tratamientos de superficie para textiles.</li> <li>- Pinturas para aplicaciones exigentes.</li> <li>- Papel de copia sin carbón.</li> <li>- Retardante de llama.</li> </ul>
		<b>Aislamientos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aislamientos térmicos</li> </ul>
		<b>Adhesivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adhesivos a prueba de agua</li> </ul>
		<b>Plastificantes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polímeros de PVC</li> <li>- Sellantes de juntas</li> <li>- Sellantes de vacío en concreto</li> </ul>

Fuente: Manual para la gestión integral de Bifenilos Policlorados, Colombia.

#### 4.4.5 Características

Los Bifenilos policlorados (PCB) comprenden un total de 209 congéneres o compuestos diferentes que teóricamente existen, su estructura química presenta dos anillos bencénicos unidos entre sí por un enlace carbono-carbono, las cuales pueden presentar diferentes grados de cloración [13].

La fórmula química es  $C_{12}H_{10-n}Cl_n$  (donde n representa el número de átomos de cloro) en donde  $1 \leq n \leq 10$ , o sea que puede contener desde uno hasta diez átomos de cloro y su estructura puede representarse así:

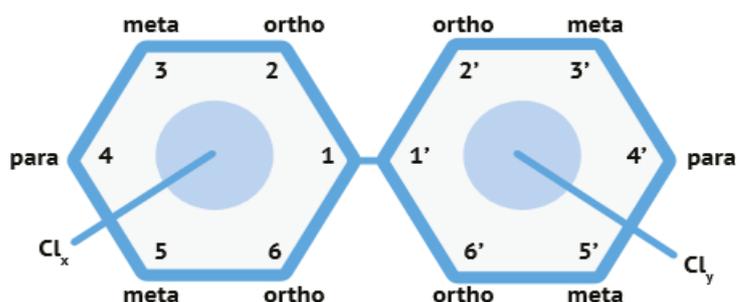


Figura 16: Estructura de un bifenilo policlorado

Fuente: Manual para la Gestión Integral de Bifenilos Policlorados – PCB, Colombia

Los PCB son líquidos oleosos fluidos y resinas transparentes duras, dependiendo del grado de sustitución del cloro en el compuesto químico.

Estos compuestos son químicamente estables y han sido utilizados en numerosas aplicaciones en virtud a sus propiedades químicas y físicas. Entre las cuales figuran la resistencia al fuego, baja conductividad eléctrica, baja solubilidad en agua y alta en solventes orgánicos y resistencia a sustancias oxidantes [13].

##### 4.4.5.1 Características fisicoquímicas

Tabla N° 13: Principales características físicos-químicas de los PCB

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICAS
Estado Físico	- A temperatura ambiente es líquido.
Densidad	- 1,182– 1,566 g/ml
Solubilidad en agua	- Baja, entre $1,08 \times 10^{-5}$ y $9,69 \times 10^{-10}$ mol/L
Solubilidad en Aceites y Solventes	- Tiene una alta solubilidad.
Solubilidad en lípidos	- Rápidamente absorbidos por tejidos grasos
Punto de inflamación	- El punto de inflamación es alta de 170 °C a 380 °C
Presión de vapor	- Son semi volátiles , se logran formar en el aire vapores que más pesados , pero no son mezclas explosivas con el aire
Constante dieléctrica	- Alta es decir tienen una baja conductividad eléctrica.

Estabilidad térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta resistencia al fuego.</li> <li>- No se llegan a cristalizar con bajas temperaturas, pero se transforman en resinas sólidas</li> </ul>
---------------------	---

Fuente: Inventario nacional de Bifenilos policlorados PNI-COP

Dentro de las características fisicoquímicas de los PCB se mencionan su identidad y propiedades fisicoquímicas, y los métodos analíticos para su detección. A continuación, presentan las principales características [13]:

#### **4.4.5.2 Identidad y propiedades físicas y químicas**

Según [13] los Bifenilos policlorados resultan al mezclar unos productos químicos aromáticos, que se llega a obtener por la cloración del bifenilo con un catalizador presente. Los PCB pueden contener en forma de impurezas a los dibenzofuranos policlorados (DFPC) y cuarterfenilos clorados. Este tipo de impurezas son estables, en condiciones normales y son resistentes a las reacciones químicas. Todos los compuestos afines a los PCB son lipófilos y su solubilidad es muy baja en agua.

Los PCB piroresistentes, la temperatura de inflamabilidad es elevada. Ocurre la formación de vapores más densos que el aire, pero ocurren mezclas explosivas con éste. Tiene una muy baja conductividad eléctrica, la conductividad térmica es excelente y presenta una alta resistencia a la degradación térmica. Los PCB bajo condiciones normales son muy estables químicamente, pero cuando se calientan pueden producir otros compuestos tóxicos, como los DFPC [13].

#### **4.4.6 Determinación de Presencia de PCB**

En año 1966, cuando se descubrió la presencia de PCB en muestras realizadas en el ambiente, incremento el interés por el analizar estos compuestos y por su nivel de toxicidad para los humanos y el medio ambiente. Los datos que se encuentran disponibles no se pueden comparar de forma directa debido, a los diferentes tipos de metodología analítica; sin embargo, el uso que se le puede dar es para poder establecer medidas de control y prevención y para una evaluación preliminar de los riesgos para el ser humano y el medio ambiente asociados a estos compuestos.

La determinación de PCB ha sido mediante cromatografía de gases con captura electrónica, aunque en estudios recientes se han usado métodos más complejos, como la cromatografía en columna capilar y la de gases combinada con la espectrometría de masas, para poder determinar de forma separada los distintos compuestos análogos, la comparación de datos analíticos mejora y poder establecer una base de datos para evaluar el nivel de toxicidad. Se necesita un amplio programa de garantía de calidad para realizar estos análisis. La validez de la muestra va a depender de la calidad y utilidad [13].

No existen pruebas que pueda identificar de forma rápida los PCB en un aceite dieléctrico, pero si pruebas rápidas de campo para detectar la presencia de cloro a partir de la cual se puede sospechar la presencia de PCB, estas pruebas están determinadas

por los kits colorimétricos Clor-N-Oil o el Analyzer L2000DX de la firma Dexsil, reconocidas por el documento guía del PNUMA. La determinación cuantitativa de PCB se suele hacer en laboratorios, utilizando diversos tipos de cromatografía [13]:

- Cromatografía de gas con columna empaquetada
- Cromatografía líquida en capa delgada
- Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

Según [13] son indispensable estos tipos de análisis si se requiere cuantificar el contenido de PCB. En la primera fase de identificación del contenido de PCB en el aceite dieléctrico los análisis cuantitativos no suelen ser necesarios, pudiendo recurrirse a las pruebas mencionadas y de resultar positivas, proceder a la verificación cromatográficas. Adicionalmente, existen dos tipos de métodos rápidos, aunque no necesariamente certeros, que pueden señalar la presencia o contenido de PCB [13]:

#### ***4.4.6.1 Prueba de Densidad***

Los aceites contaminados con PCB suelen tener una densidad alta debido a que contiene cloro. La alta densidad permite distinguirlos de los aceites minerales, que por lo general son más ligeros que el agua. Por otra parte, la gravedad específica de los aceites de PCB puede llegar a 1,5. Dicho de otro modo, un aceite de PCB siempre se irá al fondo de una mezcla con agua, mientras que un aceite mineral tenderá a flotar en la superficie.

#### ***4.4.6.2 Prueba del Cloro***

Según [13] el cloro presente se logra detectar con un análisis químico sencillo. Existen “tiras reactivas” que son sensibles a la presencia del cloro. Además, al encenderse un compuesto que contiene cloro con cobre presente aparecerá una flama verdosa, debido a que el cloro forma pequeñas cantidades de cloruro de cobre en la superficie del cobre y esta sustancia, cuando se volatiliza, produce una característica flama verdosa. Esta prueba no se recomienda por la producción no intencionada de dioxinas y foranos por la combustión realizada.

Al finalizar estas pruebas, igual que con las pruebas rápidas, conviene verificar si el cloro contenido se debe a causa de los bifenilos policlorados y no a otra sustancia que contenga cloro, mediante alguna de las pruebas cromatográficas.

Estas dos sencillas pruebas determinaran si hay cloro presente. La prueba tendrá los mismos resultados con aceites minerales clorados, que también son usados en transformadores, pero con diferente nivel de riesgo o peligro que los PCB. Aun así, se está erradicando su uso en equipos eléctricos. Los aceites dieléctricos que no presenten cloro darán negativo en las pruebas antes descritas.

#### 4.4.7 Efecto a la salud y ambiente

Según [13] los PCB son compuestos persistentes es decir pueden mantenerse en el exterior y se movilizan en la cadena trófica. Por el consumo de alimentos contaminados y por exposición laboral a través de la piel o de la vía respiratoria ingresan a nuestro organismo. Son cancerígenos. Después de que el cuerpo humano haya absorbido los compuestos, este circula por la corriente sanguínea y se llegan a almacenar (bioacumulan y biomagnifican) en tejidos grasos y en una variedad de órganos (pulmones, hígado, riñones, glándulas adrenales, cerebro, corazón y la piel), apareciendo los primeros síntomas en la piel (cáncer a la piel, cloro acné) y el hígado, pudiendo afectar los sistemas nerviosos central, reproductivo o endocrino, sistema inmunológico y el tracto gastrointestinal y respiratorio. Los derrames, vertidos, incendios o incineración son las principales fuentes de contaminación del ambiente, pudiendo generar compuestos más peligrosos como los agentes cancerígenos Dioxinas y Foranos.

#### 4.5 Los PCB en transformadores

Los transformadores son de gran importancia en el proceso de generación y distribución de electricidad. Permitiendo el aumento o la reducción del voltaje al que se transporta y utiliza la electricidad [18].

La totalidad del espacio libre del transformador se rellena con un aceite dieléctrico que es el que durante muchísimos años se ha basado en los PCB. Hoy en día en los equipos nuevos sólo se utilizan líquidos reemplazantes que no contienen PCB [18].

Tabla N° 14: Distribución de los equipos posiblemente contaminados con PCB por sector y por departamento.

	<b>Hidrocarburos</b>	<b>Industrias</b>	<b>Minería</b>	<b>Pesquería</b>	<b>Transportes y Comunicaciones</b>
Ancash	4	1	103	32	2
Arequipa	-	31	-	-	-
Cusco	2		-	-	-
Trujillo	-	14	-	-	-
Ica	-	38	-	17	-
Junín	-	7	-	-	-
La Libertad	-	32	-	-	-
Lambayeque	4	-	-	-	-
Lima	44	978	-	20	-
Moquegua	9	-	-	3	-
Piura	123	62	-	54	-
Puno	2	-	-	-	-

Fuente: Inventario nacional de bifenilos policlorados PNI-COP

Del Inventario Nacional de Bifenilos Policlorados (PCB) COP del 2006 se tiene que [13]:

Lima es el departamento con mayor cantidad de equipos posiblemente contaminados con un 65,8%, siendo en su mayoría (93,9%) equipos del sector Industrias, compuesto básicamente de transformadores, capacitores e interruptores. Esto indica claramente que, en Lima, la distribución de los equipos obliga a tener muy en cuenta el riesgo ocupacional de los trabajadores expuestos, así como el riesgo ambiental por su ubicación o cercanía a centros poblados, incluyendo hospitales, colegios, etc.

En segundo lugar, tenemos al departamento de Piura con un 15,1% de equipos, los que en más de la mitad (51,5%) pertenecen al sector Hidrocarburos y en tercer lugar a Ancash siendo en su mayoría (72,5%) equipos del sector minería.

Se puede deducir de estas cantidades que, en provincias, el problema de distribución estaría más concentrado dentro de las instalaciones productivas del sector energía y minas, lo cual por un lado implica bajo riesgo en cuanto a la salud se refiere, al estar localizados los equipos dentro de instalaciones, que por su tamaño y extensión están generalmente alejados de la población.

Actualmente en un análisis que se realizó a 130 transformadores de la ciudad de Chiclayo para determinar la presencia de PCB en los aceites dieléctrico se registraron solo 10 transformadores la mayoría monofásico adquiridos en el año 2000 de la marca MAGNETRON.

Tabla N° 15: Transformadores contaminados con PCB en la ciudad de Chiclayo

MARCA	SERIE	FASE	POTENCIA	AÑO	PESO
EPLICSAC	TR2024-11004-20				
DELCROSA	125810T2	3Ø	10	1985	710
EPLICSAC	TR2008-07048-03	1Ø	5	27-06-2008	124
MAGNETRON	70133-00	1Ø	15	2000	131
MAGNETRON	70261-00	1Ø	15	2000	131
MAGNETRON	70185-00	1Ø	15	2000	131
MAGNETRON	70254-00	1Ø	15	2000	131
MAGNETRON	70218-00	1Ø	15	2000	131
MAGNETRON	70274-00	1Ø	15	2000	131
TAIPU	0-93032	3Ø	100	2007	577

Fuente: Elaboración propia, con información de Electronorte

#### 4.5.1 Tecnologías de segregación

Según [18] para lograr eliminar el PCB de un transformador se tiene que tener en cuenta la propia estructura del equipo. La superficie metálica del transformador se descontamina fácilmente usando un solvente, se plantean dos problemas principales para este tipo de transformador:

- El primer problema que se tiene es el alambre de cobre que está revestido de un barniz. Durante su vida útil, este barniz absorbe los PCB, en un proceso que exige más tiempo lo mejor es tratar por separado las distintas piezas (cajas, bobinas, etc.) y adaptar el tiempo de descontaminación a las características de cada una de ellas

El segundo problema es grave, debido a la madera y el papel que podría hallarse presente. Estos materiales son muy porosos y difíciles de poder limpiar con un solvente. Si no se llega a descontaminar hasta concentraciones de PCB aceptables para su terraplenado (según reglamentos que varían de unos países a otros), las piezas deben incinerarse.

Para poder enfrentar el problema de la contaminación de un transformador existen dos caminos: o bien se pone fuera de servicio bien o se le cambia el aceite dieléctrico contaminado por uno nuevo libre de PCB. En el primer caso, la descontaminación completa conduce a la destrucción del transformador con posible recuperación de la mayor parte de sus componentes metálicos.

- **Extracción por Solvente:**

- Una vez vaciado el equipo, mediante el uso de solvente, como tricloroetileno o percloroetileno se extrae el aceite y PCB de las superficies metálicas y sólidos porosos. El proceso está gobernado por la difusión del PCB y aceite que lo contiene a través del material poroso con el solvente. Posteriormente se destila quedando en el reutilizable el solvente y en la cola de destilación el PCB junto con el aceite que este pueda contener
- Aplicable por lo general en equipos de PCB puro ó muy alta concentración (>50.000 ppm), a la eliminación superficies (con la recuperación de los metales) y matrices porosas, para su posterior destrucción por incineración.
- En general son instalaciones fijas, aunque existen plantas móviles.
- No se recuperan los equipos, solo se chatarrear los metales [19].

- **Retrofilling:**

- El segundo método es de retroalimentación. Mientras el transformador se encuentra en servicio se extrae el aceite eléctrico que se procesa en un circuito cerrado que permita eliminar los PCB que contiene. Para la práctica de esta retroalimentación existen varias tecnologías [19].
- Consiste en el drenado y posterior llenado del transformador, pudiendo realizarse alguna recirculación previamente a fin de extraer los aceites de las cubas. O bien la recirculación aceites de las cubas.
- Se debe contar con el sistema de eliminación disponible para los aceites contaminados, a fin de no generar más fluidos contaminados de los poseían previamente.
- Posteriormente realizada la intervención, el equipo queda en un periodo de exudación (de 90 días), luego del cual se analiza.
- Se aplica a transformadores con bajas medias y altas (<50 000 ppm), tanto en plantas fijas, como in situ.
- Permite la utilización del equipo una vez reclasificado (descontaminado) [19].

Según [19] la desventaja principal del retrofilling es que los PCB se encuentran en las estructuras porosas de madera del transformador. Así, estos materiales porosos liberan los PCB lentamente al tiempo que durante el proceso de descontaminación va reduciéndose la concentración de PCB en los aceites limpios. Este proceso de difusión no llega a concluir en el lapso de tiempo que dura la operación de retrofilling y más tarde, a medida que se prosiga la difusión, la concentración de PCB aumentará en el transformador retroalimentado. A causa de que la concentración de PCB aumento en el nuevo aceite puede superar al límite, lo que obligará a otro retrofilling.

Pese a estos factores, el retrofilling se emplea con bastante frecuencia y con éxito a grandes transformadores. Las tecnologías que son propuestas para la eliminación del PCB de los transformadores han de tener en cuenta cada uno de estos factores [19].

#### **4.6 Tecnologías para la separación y destrucción de los residuos de PCB**

En la Figura 17 se muestra esquemáticamente el caso de aceites dieléctricos contaminados con Bifenilos policlorados. Es posible la separación del aceite dieléctrico de los PCB mediante una separación física, se tiene que verificar la concentración de PCB el cual debe estar dentro de los límites permitidos para su reutilización.

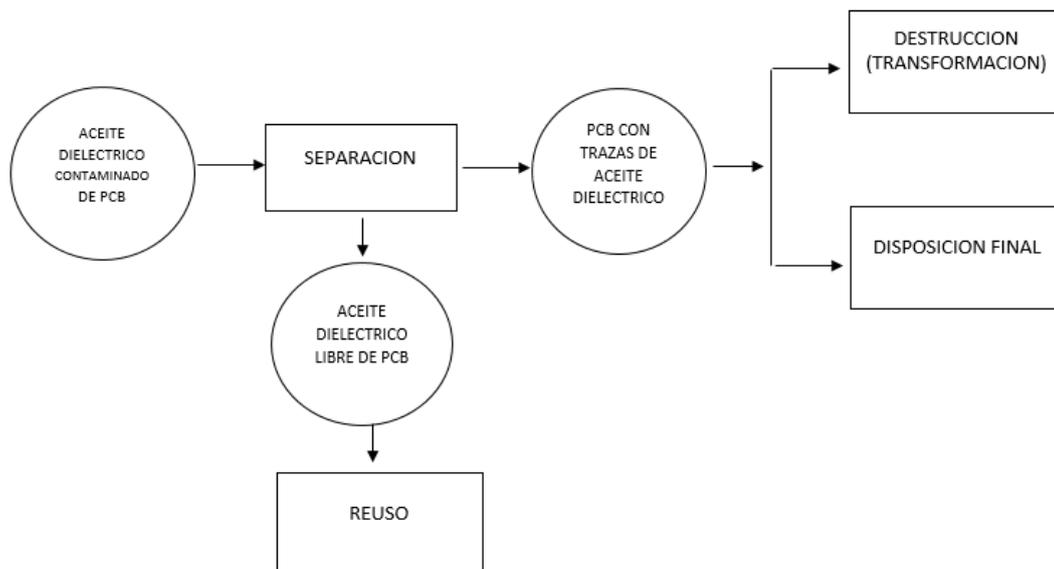


Figura 17: Separación y posterior transformación de los PCB  
 Fuente: Rev. Per. Quím. Ing. Quím. Vol. 19, N. ° 1, 2016, pág. 44

En la Figura 18 se muestra de forma esquemática el caso en que el aceite dieléctrico está contaminado con los PCB pueden ser transformados o destruidos, empleando tecnologías que implican métodos químicos, térmicos o biológicos, y su disposición final.

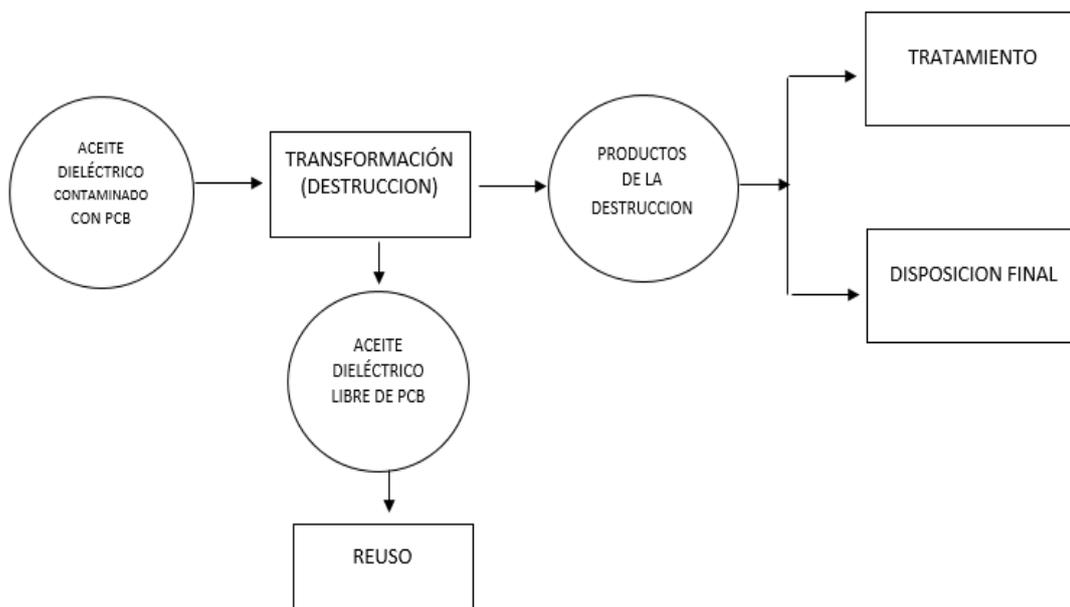


Figura 18: Transformación de los PCB presentes en aceites dieléctricos contaminados  
 Fuente: Rev. Per. Quím. Ing. Quím. Vol. 19, N. ° 1, 2016, pág. 44

En la Figura 19 se muestra un diagrama detallado desde la identificación de PCB en aceites dieléctricos, su posterior decantación y la eliminación del PCB, hasta la disposición final. A continuación, se describe de forma breve los tipos de tecnología utilizadas para la separación y destrucción responsable de PCB (y sus residuos).

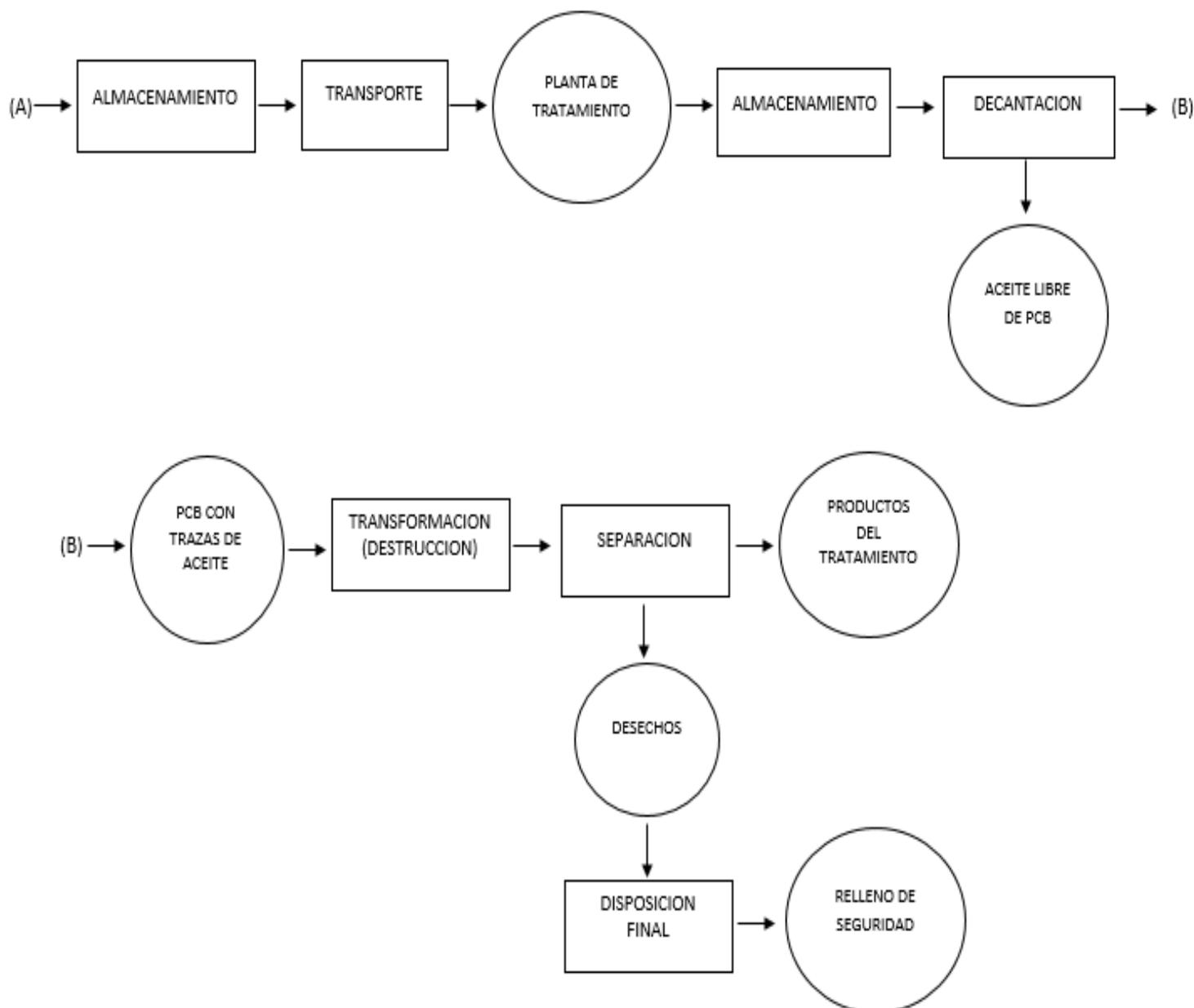


Figura 19: Diagrama de bloques para la transformación de PCB, previa separación del aceite dieléctrico

Fuente: Rev. Per. Quím. Ing. Quím. Vol. 19, N. ° 1, 2016, pág. 44

#### **4.6.1 Separación (Tecnologías que implican el uso de métodos físicos):**

Los métodos no están dentro de las opciones destructivas, sino que implican retirar de forma mecánica los residuos de PCB de los transformadores, mediante la extracción del aceite dieléctrico PCB, aprovechando que los hidrocarburos policlorados tienden a ser más pesados que el aceite, en consecuencia, se depositan en el fondo de los recipientes en los que se encuentra y de tal manera que se les puede separar con una decantación previa, desde los tanques de almacenamiento. El drenaje es una de las formas más sencilla de lograr la separación de los PCB, pero este método traslada el problema de un medio a otro. Un método más complejo es la destilación, pero necesita de un tratamiento experimental para poder determinar las condiciones óptimas para hacerlo, sobre todo para no alterar la composición del aceite dieléctrico y pueda obtener su recuperación; al igual que los PCB, para su posterior destrucción. Las opciones indicadas están incluidas como parte de los métodos fisicoquímicos [14].

#### **4.6.2 Transformación (Destrucción)**

##### ***4.6.2.1 Tecnologías basadas en métodos químicos para eliminar el PCB***

Los bifenilos policlorados representan un gran problema para lograr su descomposición, debido a que los enlaces (carbonohalógeno) que se encuentran en su estructura son altamente estables,

Los métodos como la dehidrohalogenación catalítica clorólisis, reacciones con ozono, reacciones con sales fundidas y reducciones con metales alcalinos solo llegan a una deshalogenación parcial. Por otro lado, estos tipos de métodos implican desventajas, como emplear costosos reactivos, controles estrictos de temperatura atmósferas inertes, equipos complejos y elevado consumo de energía, entre otros.

La mayoría de los métodos químicos que implican destruir los PCB que contaminan el aceite dieléctrico, pueden llevarse a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas moderadas, aunque eliminan los PCB en el aceite, no logran destruir el aceite dieléctrico en sí [14].

##### ***4.6.2.2 Tecnologías basadas en métodos químicos no catalíticos***

**a) Declorinación:** El proceso de declorinación emplea reactivos químicos para lograr romper los enlaces en la molécula del PCB (muy estable), como resultado se tienen otros compuestos químicos menos peligrosos para el ser humano y el ambiente. Estos métodos químicos no actúan sobre la estructura del bifenilo en la molécula de PCB (Ver Figura 16), solo se mueven los átomos de cloro, estos le dan a la molécula de PCB su estabilidad química y biológica.

Este proceso de transformación consiste en retiro selectivo de los átomos de cloro de las moléculas de PCB, eliminando las características que los hace peligroso ambientalmente [14].



Se ha encontrado que el procedimiento de pre elaboración del reactivo (sodio – naftaleno) seguido por la reacción de éste con los PCB, es más eficiente, en términos del avance de la reacción y el tiempo que toma ésta en comparación con un procedimiento en el cual el sodio se adiciona a una solución de naftaleno y PCB en solvente. La reacción química que da lugar a la formación del reactivo sodio - naftaleno es la siguiente [16]:

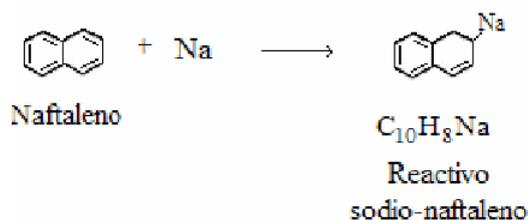


Figura 21: Reacción de formación del reactivo sodio-naftaleno

Fuente: Purificación de aceite aislantes contaminados con PCB, E. Lopera Posada

Luego procede la reacción entre los PCB y este complejo de naftaleno y sodio. El resultado de esta reacción es cloruro sódico, mientras que los esqueletos carbonatados del compuesto organoclorado tienden a polimerizarse, sobre todo si son de naturaleza aromática [16].

- **Proceso Alternativo Goodyear**

Según [16] este proceso es una variación del que se describió anteriormente, las principales diferencias consisten en la formación de una dispersión de sodio finamente dividido en aceite (arena de sodio) y en las cantidades de reactivos utilizados.

El reactivo de sodio - naftaleno se elabora en dos pasos, en proceso discontinuo. En el primer paso, el sodio metálico es calentado bajo atmósfera inerte a 150-170°C. El enfriamiento de la mezcla ocurre a temperatura ambiente con agitación fuerte, como resultado se tiene una arena de sodio finamente dividida. En el segundo paso, una solución de tetrahidrofurano y naftaleno se añade a la dispersión de sodio a una temperatura ambiente, formando el reactivo de aspecto negro verdoso. El reactivo se añade a los PCB´s en cantidades suficientes para dar una relación cloro/reactivo en un rango de 6:1 a 100:1, dependiendo del tipo de fluido y su nivel de contaminación. La reacción procede rápidamente a temperatura ambiente [16].

- **Proceso KPEG**

Según [16] es un proceso con una descomposición muy eficiente, de compuestos orgánicos halogenados, empleando un reactivo producto de la reacción de un hidróxido de metal alcalino, un poliglicol o poliglicol monoalquil éter, y oxígeno, resultando un polietilenglicolato de metal alcalino. Este reactivo de descomposición da resultados comparables con los obtenidos con un método que emplea un reactivo de descomposición producido a partir de un metal alcalino elemental.

Ocurre la descomposición por la reacción de los PCB con el reactivo de descomposición en presencia de oxígeno. Esto se puede obtener de forma fácil, mezclando los reactantes a una temperatura de ambiente en un reactor abierto a la atmósfera [16].

La reacción que se lleva a cabo para la obtención del reactivo de descloración KPEG es la siguiente [16]:

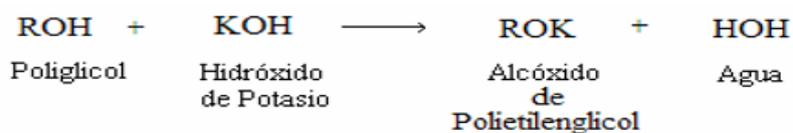


Figura 22: Reacción de formación del agente de descloración KPEG

Fuente: Purificación de aceite aislantes contaminados con PCB, E. Lopera Posada

La descomposición de PCB usando este método tiene como resultado productos relativamente inocuos, entre los principales son cloruro de sodio y varios compuestos orgánicos deshalogenados, como por ejemplo derivados fenólicos de los PCB.

La destrucción de los PCB en un medio no polar, usando KPEG como agente de descloración, implica la sustitución nucleofílica aromática de los cloruros de los PCB por el alcóxido de polietilenglicol para producir un aril polietilenglicolato y una sal, en este caso, KCl. Esta reacción es [16]:

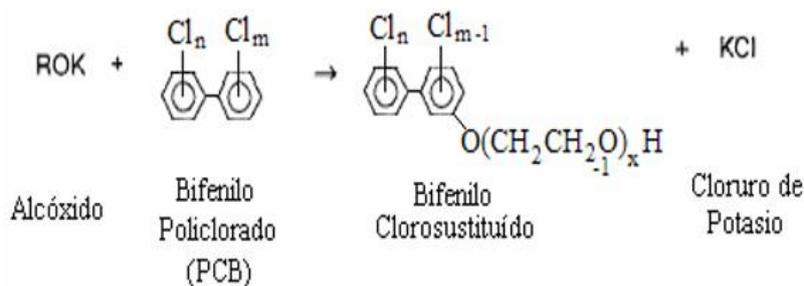


Figura 23: Reacción de descloración de PCB con KPEG  
Fuente: Purificación de aceite aislantes contaminados con PCB, E. Lopera Posada

- **Proceso KOH – Adsorbente**

Según [16] este es un método de decloración de PC por la reacción de un compuesto halogenado con un hidróxido de metal alcalino (hidróxido sodio o de potasio), o por la reacción de un compuesto halogenado con un hidróxido de metal alcalino- térreo.

El aceite dieléctrico (PCB) es mezclado con el hidróxido de metal alcalino en forma discontinua, y luego atraviesa una columna que contiene un filtrante adsorbente. Un adsorbente especialmente recomendable es la alúmina activada, por tener unas buenas características de adsorción y debido a que puede ser reactivada después de usarse. En este proceso también se presenta una reacción de sustitución, así [16]:

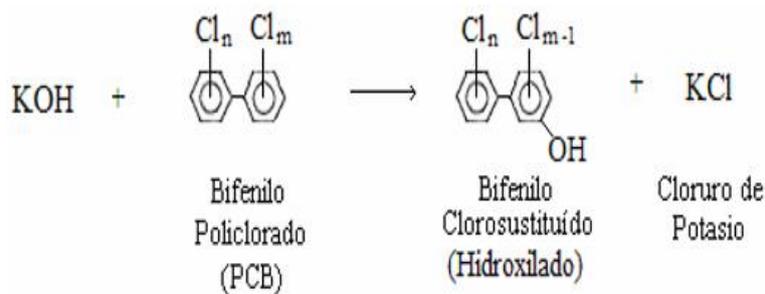


Figura 24: Reacción de eliminación de los PCB's con KOH  
Fuente: Purificación de aceite aislantes contaminados con PCB, E. Lopera Posada

Los productos de la decloración pueden ser separados y el aceite dieléctrico regenerado para su posterior reutilización. Es importante anotar que en este método no es necesario separar los PCB para efectuar la decloración.

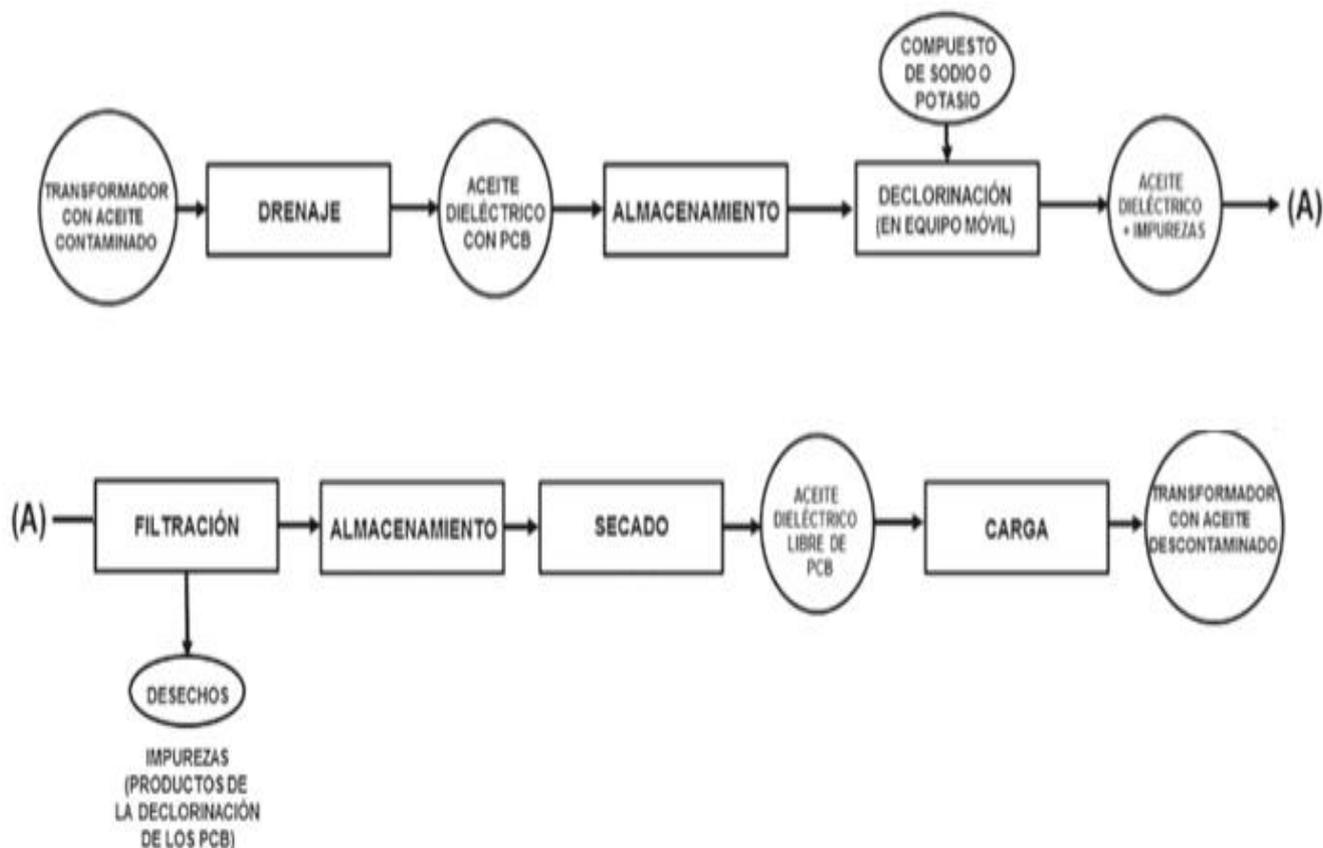


Figura 25: Diagrama del proceso para declorinación in situ de aceites dieléctricos contaminados con PCB

Fuente: Rev. Per. Quím. Ing. Quím. Vol. 19, N. ° 1, 2016, pág. 44

### b) Reducción química en fase gaseosa (GPCR)

Según [14] consiste en la reacción de los residuos de PCB con hidrógeno a 850°C, formando un gas metano y cloruro de hidrógeno, que se recoge en agua. El ácido clorhídrico formado es neutralizado y el CH<sub>4</sub> se recupera para utilizarlo como combustible.

#### 4.6.2.3 Tecnologías basadas en métodos químicos catalíticos

Descomposición por catálisis básica (BCD) Los residuos que contienen PCB se tratan a 300°C, con una mezcla reaccionante formada por un hidrocarburo de alto punto de ebullición, hidróxido de sodio y un catalizador, produciendo hidrógeno, altamente reactivo, que reacciona rompiendo los enlaces de los PCB [14].

### 4.6.3 Tecnologías basadas en métodos térmicos

Según [14] la incineración convencional implica la oxidación de los residuos que contienen PCB a elevadas temperaturas, para poder transformarlos en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y compuestos inorgánicos, como el cloruro de hidrógeno (HCl), que se retiran antes de poder emitir a la atmósfera, al igual que las cenizas, generadas en el proceso. Si el proceso de incineración es efectivo o no depende de las siguientes variables: tiempo de residencia en la cámara de combustión, temperatura y turbulencia; las cuales corresponden a la “triple T” y el exceso de oxígeno. La destrucción de los PCB se evalúa por un indicador tecnológico del proceso conocido como DRE (por sus siglas en inglés, o eficiencia de destrucción), que es del orden del 99,99%. Las condiciones de operación mínimas sugeridas para la cámara de combustión principal son [14]:

- Tiempo de residencia: 2 segundos, a 1200°C y un exceso de oxígeno del 3%
- Tiempo de residencia: 1, segundos, a 1600°C y un exceso de oxígeno del 2%

La incineración puede ser realizada en instalaciones que están diseñadas específicamente para tratar los PCB y otros residuos clorados, también pueden aprovecharse instalaciones previstas para el tratamiento térmico de otros materiales [14].

### 4.7 Métodos de reacondicionado y recuperación de aceites aislante envejecidos en servicio

Según [15] el reacondicionamiento del aceite dieléctrico consiste en la remoción de humedad y partículas sólidas a través de operaciones mecánicas y recuperación del aceite, eliminando contaminantes ácidos, coloides y producidos por la oxidación por medio de reacciones químicas o adsorción superficial.

Para tener un completo reacondicionamiento del aceite tenemos que tener en cuenta que tenemos que eliminar los gases disueltos, el secado del aceite, y el agente contaminante ácidos, lodos con el fin de obtener un aceite con características similares a un aceite nuevo [4].

#### 4.7.1 Reacondicionamiento

Según [15] la rigidez dieléctrica decae debido al agua o partículas sólidas presentes en el aceite dieléctrico, por lo tanto, se debe eliminar las mismas. El reacondicionamiento es un proceso que implica la eliminación por vía física las partículas sólidas y la disminución del porcentaje de agua en el aceite.

Los medios físicos empleados para eliminar el agua y las partículas sólidas incluyen varios tipos de filtrado, centrifugado y procesos de secado en vacío.

##### 4.7.1.1 Método para la eliminación de los gases disueltos

Para extraer los gases disueltos en el aceite se usa el vacío. Los requerimientos de la metodología para la extracción deben cumplir que:

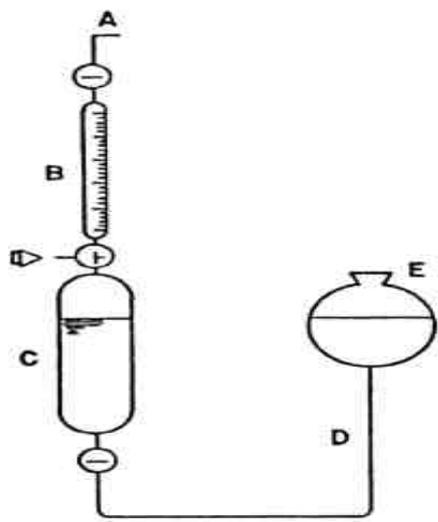
- El equipo debe ser capaz de extraer al menos el 97% de los gases disueltos.

- El equipo evite que los gases extraídos se disuelvan nuevamente en el aceite.
- El equipo suministre un vacío estricto.

En el caso de lograr una extracción completa los resultados del análisis de gases se pueden relacionar de forma directa con la cantidad de gases contenida en el transformador.

Diferentes tipos de equipos usados para la extracción de los gases [4]:

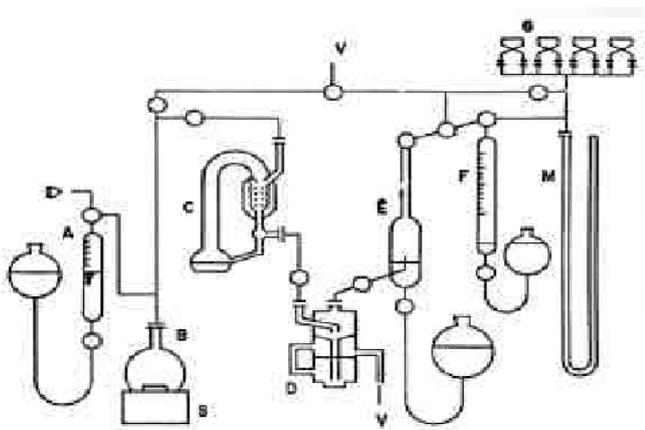
- **Extractor de gas tipo torricelly:** La gran ventaja de este extractor es su construcción simple, pero tiene muy baja capacidad de extracción.



- A conexión a bomba de vacío y a muestreo de gas
- B indicador de gas (bureta)
- C tubo de desgasificación
- D tubo corrector
- E depósito de mercurio

Figura 26: Extractor de gas tipo Torricelly  
Fuente: Brettis [4]

- **Extractor de gas tipo bomba toepler:** Entre los diferentes extractores este es el más eficiente para extraer gases, pero su estructura complicada y el trabajar con un gran volumen de cristalería de laboratorio lo hacen solo en procesos que requieran alta precisión.

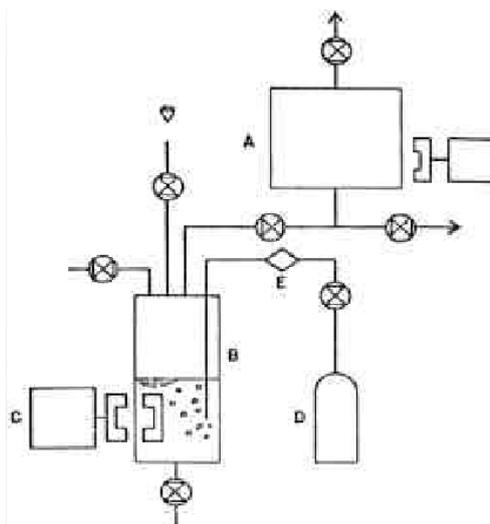


- A Indicador de nivel de aceite (bureta)
- B cámara de desgasificación
- C Bomba de mercurio
- D Bomba Toepler
- E Tubo conector de gas
- F Indicador de gas (bureta)
- G Serpentín probador de gas
- M Manómetro de mercurio
- S Agitador magnético
- V Bomba de vacío

Figura 27: Extractor de gas tipo bomba toeplet  
Fuente: Brettis

- **Extractor de gas tipo burbujeo:** La principal ventaja que la muestra que se tiene sufre poca manipulación e inmediatamente se dispone de los gases extraídos, este tipo de extractor está conectado permanentemente a un cromatógrafo de gases.

Este extractor tiene una mayor capacidad de extracción de gases que el tipo torricelly pero ligeramente por debajo del tipo bomba toepler.



- A colector de gas
- B cámara de burbujeo
- C agitador magnético
- D cilindro de gas
- E regulador de flujo

Figura 28: Extractor de gas tipo burbujeo  
Fuente: Brettis

#### 4.7.1.2 Secado del aceite

Según [4] cuando la rigidez dieléctrica está por igual o menor al voltaje de diseño del transformador se recomienda realizar el secado del aceite. Comúnmente, la humedad presente en el aceite tiene como consecuencia el recalentamiento frecuente del equipo, favoreciendo la fijación o la disolución de humedad atmosférica en el aceite, sabiendo que la solubilidad del agua en el aceite aumenta con la temperatura.

El secado del aceite dieléctrico se realiza mediante operaciones convencionales siguientes [4]:

- a) Filtración del aceite dieléctrico húmedo a través de un medio secante o hidrófilo.
- b) La evaporación al vacío del agua contenida en el aceite.
- c) La combinación de (a) más la evaporación al vacío del aceite filtrado

Filtrar el aceite a través de un medio secante que comúnmente son el papel seco o arcilla activada, este medio no solo reduce la cantidad de humedad en el aceite (disuelta o suspendida) sino que también logra eliminar las partículas sólidas de lodo

suspendidas en él, teniendo como resultado la considerable disminución del grado de acidez del aceite. Sin embargo, el grado de secado que se obtienen con estos procesos de filtración depende de la humedad relativa originalmente contenida en la medio secante empleada. Realizar un control de forma continua del contenido de agua del aceite a la salida es muy útil para verificar que el proceso está trabajando de manera eficiente [4].

Para lograr la eliminación de agente que contaminan o agua suspendida se suele realizar un filtrado, el aceite dieléctrico atraviesa por sustancias hidrosopias tales como cloruro de calcio, y luego por arena calcinada para una eliminación total del agua presente en el aislante, otra manera de deshidratar el aceite es hacer circular a través de un papel secante, este método tiene costos elevados si se desean tener óptimos resultados, se debe tener la precaución porque existe el riesgo de incorporar partículas fibrosas procedentes de la celulosa del papel [15]. Uno de los principales equipos que se usan ampliamente en la filtración del aceite es el filtro prensa, se conforma por una serie de placas de papel secante, a través de estas se hace circular repetidamente el aceite hasta la reducción del nivel de humedad a valores aceptables. Con este método se pueden lograr niveles mínimos hasta de 30 ppm [4].

#### **4.7.1.3 Calefacción directa**

Según [15] Cuando no se opera en condiciones de vacío, se recomienda limitar la temperatura a 60 grados centígrados, para ello se usa calefacción a través de resistencia o por insuflación de gases. El primer proceso es fácil y eficaz, pero el tiempo de duración es largo, si las resistencias llegan a superar la temperatura establecida se llega producir una fuerte oxidación del aceite, si esta llegara a tener contacto con el aire. Ocurre una pérdida considerable de aceite por evaporación, y el resto adquiere una mayor viscosidad, el calentamiento debe prolongarse un largo tiempo hasta obtener un secado satisfactorio. Es un proceso de un bajo costo, pero con los inconvenientes antes descritos.

#### **4.7.1.4 Calentamiento realizado por medio de gases**

Método parecido al anterior, el riesgo que se corre es el de producir calentamientos locales, debido a que el aceite tenga una mala conductividad, ocasionando descomposiciones que llegan a reducir la estabilidad química de la misma [15].

#### **4.7.1.5 Centrifugación:**

En este proceso el aceite caliente, aproximadamente a 60 ° C., es colocado en un tambor giratorio, de forma que el agua y las partículas sólidas que poseen mayor peso específico que el aceite, se precipitaran hacia la superficie del tambor logrando así separar del aceite. Como la diferencia pesos específicos entre el agua y el aceite es muy pequeña, el proceso de centrifugación se debe realizar por un largo periodo de tiempo, hasta que el aceite quede totalmente libre de impurezas [15].

#### **4.7.1.6 Tratamiento del aceite en vacío**

Este método mejora las deficiencias de los métodos anteriores, permitiendo emplear elevadas temperaturas. Sin embargo, a las presiones en las que se usa, que van desde los 5 hasta los 100 Pa., con temperaturas que varían desde los 40 a 80 grados centígrados, es preferible que la temperatura inicial no sea tan alta para evitar las pérdidas de fracciones livianas del aceite. Si no se tuviese información del aceite a tratar no se debe superar los 70 grados centígrados [15].

El tratamiento del aceite en vacío y a elevadas temperaturas puede provocar una pérdida parcial de los inhibidores de oxidación, que por lo normal son más volátiles que el aceite mineral [15].

Cuando se desea la eliminación de contaminantes sólidos o agua libre es conveniente realizar los tratamientos a una temperatura ambiente, y si se desea eliminar agua disuelta o en suspensión los tratamientos son más eficientes si se realizan con el aceite en caliente y vacío [15].

#### **4.7.1.7 Deshidratación por vacío**

Según [4] Este método está generalizado y es el más eficiente para la eliminación de la humedad que está en el aceite dieléctrico, este método consiste en evaporar o deshidratar al vacío y a temperaturas moderadas. Con este método la humedad es reducida a niveles más bajos que los que se obtienen con los procesos de filtración, por ejemplo, hasta 15 ppm, pero no logra eliminar los sólidos suspendidos en el aceite. De tal manera, si es que el aceite está contaminado con materias sólidas es recomendable una previa filtración antes de tratamiento en vacío.

Existen dos tipos de deshidratadores por vacío:

- El primer deshidratador pulveriza el aceite en una cámara de vacío.
- El segundo tipo de deshidratador el aceite es escurrido por capas delgadas sobre una serie de placas separadas ubicadas en zigzag dentro de una cámara de vacío.

De esta forma se obtiene un aceite deshidratado, desgasificado y los ácidos más volátiles son eliminados [15].

El tratamiento que se realiza en vacío y la alta temperatura de los aceites minerales inhibidos pueden lograr eliminar de forma parcial a los inhibidores de oxidación empleados comúnmente, di-iso-butil-para-cresol y el di-isobutil-fenol, que son más volátiles que el aceite mineral [4].

Tabla N° 16: Valores de temperaturas y presiones para purificar aceite mineral aislante.

Temperatura (° C)	Presión (Pa)
40	5
50	10
60	20
70	40
80	100

Fuente: Brettis <http://www.brettis.com/Tutorial/08Transformadores.pdf>

#### 4.7.2 Recuperación

Según [15] en el proceso de recuperación se elimina agentes ácidos contaminantes, lodos y, de forma general, productos de oxidación (solubles y no solubles). Se realiza a través de medios químicos, absorción, y contacto, además de emplear medios mecánicos, percolación, esto se logra usando reactivos de manera que logre absorber las impurezas o usar filtros de papel, tierras filtrantes. Cuando se emplean tierras filtrantes por lo general son arcillas naturales que tienen una alta actividad superficial. Se pueden usar en forma natural con un previo secado, molienda y clasificación por tamaño, o puede ser calentadas, lavadas con agua, tratadas con vapor de agua o tratada con ácidos, con el fin de poder activarlas y hacerlas más eficientes. Estos tratamientos previos que se le hacen ayudan a mejorar las propiedades absorbentes del material, pero las encarecen. La alúmina activada es un absorbente eficiente, es mecánicamente muy estable y puede ser reactivada.

##### 4.7.2.1 Tierra Fuller

Según [12] el término tierra fuller da referencia sobre la clase natural de arcilla absorbente, la arcilla atapulguita es la principal constituyente, este tipo de arcilla se ha empleado de forma satisfactoria por años, logrando la recuperación de aceites dieléctricos, gracias a su alta capacidad de poder absorber compuestos polares y de la clarificación de los mismos.

La estructura cristalina de la arcilla atapulguita es la que la hace tan única. Mineralmente, la arcilla es hallada como silicato de aluminio y magnesio hidratado. Durante el procesamiento la arcilla es triturada, calentada y activada. La temperatura para la activación con calor y la etapa de secado determinan el grado de porosidad interna de la arcilla. Esta porosidad contribuye a ampliar la superficie de la arcilla y por lo tanto a mejorar su capacidad de absorción [12].

La tierra fuller se llega a activar a temperaturas entre 800° a 1100° F. Este tratamiento desarrolla porosidades en la arcilla de hasta 125 m<sup>2</sup>/gramo.

Para seleccionar el tamaño de partícula de la arcilla se debe tener en cuenta el tipo de equipo de regeneración que se usara. Debido a esto la tierra fuller está clasificada en varios grados, según el tamaño de las partículas dadas en mesh 15-30, 30-60, 50-80 en productos granulares y 100-200 para productos de polvo fino [12].

Los productos comercialmente son los granulares y de polvo fino, estos son vendidos como RVM (Materia de Volatilidad Regular) teniendo un 6% de humedad libre o LVM (Materia de Baja Volatilidad) con 1% de humedad libre medida como porcentaje de peso a 220°F (104,4 °C) [12].

Con la finalidad de aumentar la velocidad de absorción, se usa la arcilla granular de mayor tamaño (30-60 mesh). No obstante, mientras el tamaño de los granos de la arcilla es mayor, menor es la capacidad de absorción [12].

Existen otros materiales absorbentes que pueden usarse en la regeneración de aceites dieléctricos. Los más conocidos son la bauxita y las zeolitas [12].

- **La bauxita:** Se le conoce también como alúmina activada, compuesto por óxido de aluminio en su forma porosa y su activación es mediante un tratamiento térmico. A pesar de que el costo inicial es alto, ésta puede ser reutilizada de 20 a 25 veces sin tener problemas de saturación, sin embargo, su regeneración es un proceso difícil.
- **Las zeolitas:** Son silicatos de aluminio con la inusual característica de poder soportar la deshidratación sin tener ningún cambio en su estructura cristalina tipo a4 es usada para la regeneración del aceite dieléctrico. La zeolita puede regenerarse, sin embargo, el costo es muy elevado comparado al de otros absorbentes, Debido a esto se utiliza generalmente en laboratorios y no en el tratamiento de aceites de transformadores de gran tamaño [12].

#### 4.7.2.2 Métodos de Recuperación del Aceite con Tierra Fuller

Existen dos tipos de métodos para la recuperación del aceite por medio de tierra fuller; el primer método es el de contacto y el segundo es el método de percolación. El primer método consiste en mezclar el aceite dieléctrico que se pretende recuperar con la tierra fuller en polvo, bajo ciertas condiciones controladas de tiempo y temperatura. Terminando la adsorción, la tierra es separada del aceite purificado [12].

En el otro proceso, conocido también como percolación, el aceite atraviesa una columna de tierra fuller granular. Para el espesor de la columna de tierra fuller está relacionada con la unidad a emplearse, pueden ser de tipo de tipo torre y cartucho o se pueden acondicionar columnas [12].

#### 4.7.2.2.1 Método de Contacto

El método de contacto es muy conocido y es generalmente el más utilizado, consiste en una simple agitación del aceite dieléctrico con la tierra fuller, esta alcanza buen contacto y adsorción. Cuando el adsorbente y el llegan a un punto de equilibrio, es descargado a través de un filtro para la separación de la tierra fuller del aceite [12].

En la figura 29 representa el diagrama de la unidad del método por contacto. El equipo de filtro prensa se emplea al tratar aceites muy deteriorados o han sufrido fallas en operación. En el caso de aceites que no estén muy contaminados, no se necesita emplear el filtro prensa. Posteriormente, el aceite se bombea hacia el tanque de mezcla y se agrega la cantidad necesaria de tierra fuller con el agitador en funcionamiento. El calentador se usa para alcanzar la temperatura a la cual la adsorción tome poco tiempo. Cuando se logra una adsorción completa, se separa el adsorbente utilizado y el aceite recuperado por medio de otro filtro prensa. Para obtener una mejor adsorción es necesario usar tierra fuller en polvo [12].

En la práctica, la cantidad de tierra fuller empleada en la unidad de contacto es de aproximadamente una libra (453,6 gr) por galón de aceite. La temperatura recomendable de contacto es de 80°C de 20 a 30 minutos. Este método resulta rentable para cantidades pequeñas de aceite [12].

En los últimos años este tipo de método no ha conseguido una gran aceptación para la recuperación del aceite dieléctrico por las siguientes razones [12]:

- El método es lento, exigiendo una acción repetida para obtener un tratamiento satisfactorio.
- Para lograr separar la tierra fuller se necesita un costo elevado.

La cantidad del aceite tratado es menor comparado con métodos de purificación a base de tierra fuller.

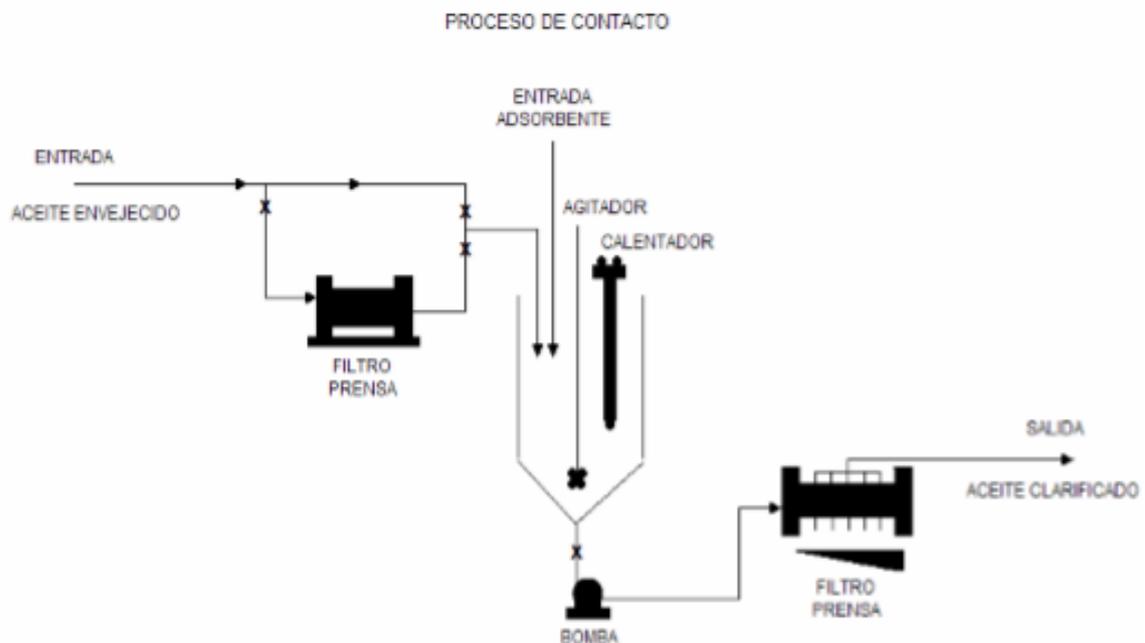


Figura 29: Proceso de contacto

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos. M.G. Briones Martínez.

#### 4.7.2.2.2 Método de percolación

El método de percolación es empleado para la denominación de procesos en los cuales el aceite atraviesa una cama compacta de tierra fuller, por acción de la gravedad o por presión.

Actualmente existen dos tipos de percolación: por medio de cartuchos y con columnas acondicionadas. En ambos métodos, el aceite dieléctrico que se quiere recuperar atraviesa un depósito que contiene la tierra fuller. La eficiencia de estos métodos está directamente relacionada con los siguientes parámetros básicos [12]:

- Granulometría del adsorbente.
- Densidad de la columna de tierra fuller
- Grosos de la columna de tierra fuller
- Viscosidad del aceite

La principal ventaja del tratamiento de percolación sobre el método de contacto que fue descrito anteriormente, es la alta calidad de eliminación de contaminantes durante un largo periodo de tiempo [12].

- **Unidad de Tipo Cartucho**

En la figura 30 representa el diagrama simplificado de la unidad tipo cartucho. Como se mencionó anteriormente el equipo de filtro prensa es empleado con aceites muy deteriorados. Para aceites que no estén contaminados, no es necesario emplear el filtro prensa. Luego de esto, el cartucho es llenado con arcilla atapulguita de 50 a 60 RVM y luego es incorporado en la unidad. El aceite fluye en el centro del cartucho y en una menor proporción puede fluir horizontalmente hacia el espacio anular que lo rodea. En otras unidades el aceite puede fluir horizontalmente hacia el centro, el calentador es utilizado para agilitar el tiempo de adsorción. Cuando se completa la adsorción, se separa el adsorbente gastado y el aceite purificado por medio de otro filtro prensa [12].

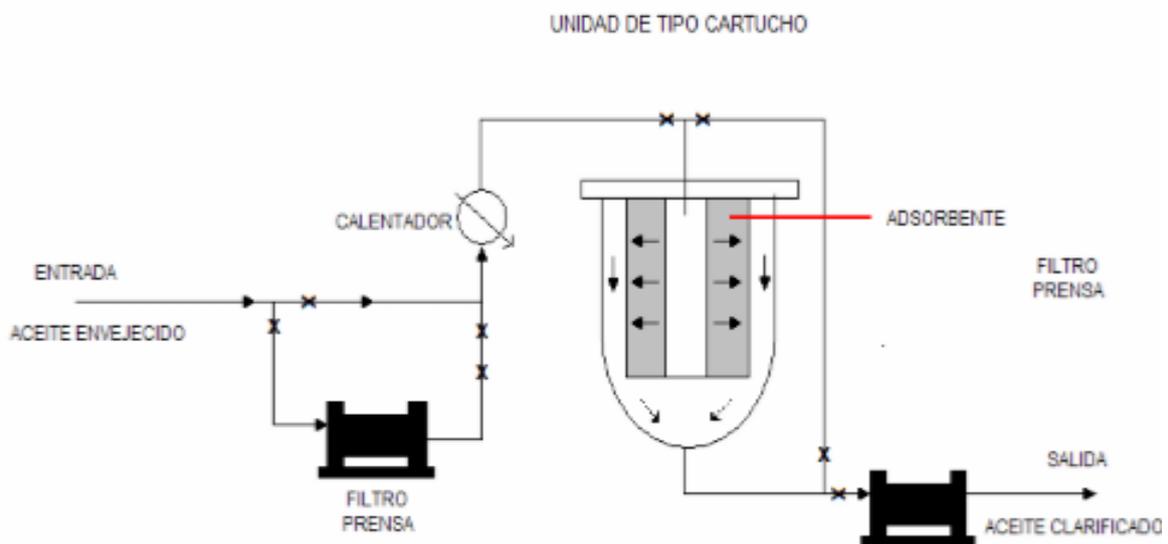


Figura 30: Unidad de tipo cartucho

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos.  
M.G. Briones Martínez.

Como se puede observar, el flujo horizontal del aceite a través de una capa adsorbente relativamente fina lo hace una de las características más importantes. Para poder lograr esto, el aceite es bombeado hacia el cartucho con presión. La granulometría del adsorbente es empleada para lograr facilitar la adsorción y al mismo tiempo el flujo. La capa de tierra fuller debe ser fina para evitar excesivas caídas de presión [12].

Con una correcta operación de la unidad tipo cartucho, puede llegar a entregar un aceite recuperado de alta calidad, por lo cual se recomienda un control adecuado sobre la cantidad de aceite que pasa por el cartucho antes de ser reemplazado [12].

Para el uso en el campo, se utilizan los cartuchos descartables. Este método reduce el trabajo manual por lo que el reemplazo de los cartuchos es simple y rápida. En los

equipos tipo cartucho se combinan dos funciones: El tratamiento con tierra fuller y la filtración por pulimento [12].

- **Percolación Tipo Torre**

El método de percolación de tipo torre a diferencia del método con cartuchos, el aceite fluye verticalmente a través de la capa de tierra fuller en vez de horizontalmente.

Actualmente se tiene la tendencia de usar filtros acondicionados con tierra fuller suelta, rellenos de forma manual o a vacío, en la parte inferior se tiene una abertura para facilitar la descarga. Se recomienda usar una bomba que genere vacío en la carcasa del filtro y así facilitar su relleno directamente de los sacos que contiene tierra fuller a través de mangueras flexibles [12].

La figura 31 representa el flujo del aceite en el método de percolación tipo torre. Los filtros son envases cilíndricos cerrados herméticamente, en su interior contienen una columna de arcilla adsorbente granulada. Generalmente la tierra que se usa es arcilla atapulguita de 30 a 60 AA LVM Mesh o bauxita Porocel de 20 a 60 Mesh 2% V.M. las cuales permiten un flujo rápido sin excesiva caída de presión [12].

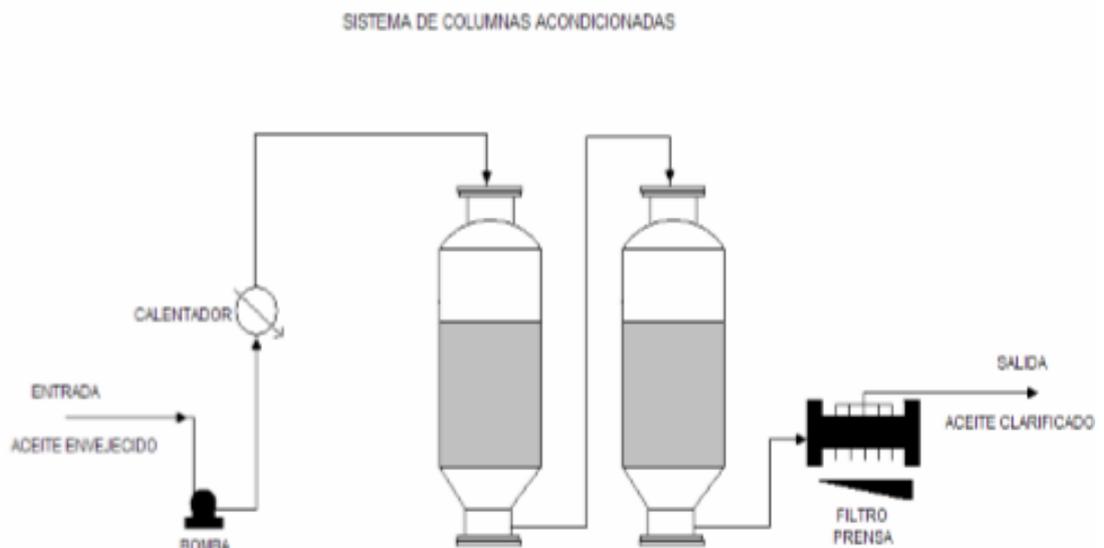


Figura 31: Unidad de percolación

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos.  
M.G. Briones Martínez.

En la práctica, la capa adsorbente debe tener una altura mínima de 15 pies (457,2 cm) para columna de hasta 5 pies (152,4 cm) de diámetro.

Para columnas cuyo diámetro excede los 5 pies (152.4 cm), la relación altura a diámetro debe ser por lo menos de 3 a 1. Para pruebas de evaluación la columna de percolación debe tener una relación de altura a diámetro de 10 a 1. En general, para

recuperar un galón de aceite, se necesitan aproximadamente 2.5 libras (11,33 kg) de arcilla adsorbente [12].

Para poder aprovechar al máximo la tierra fuller, se puede usar un sistema de dos o más columnas que están comunicadas con tuberías. Este tipo de sistema se puede operar en paralelo y en serie, se usan en paralelo cuando se tiene un aceite con baja contaminación, o en serie cuando se necesita un alto desprendimiento de acidez del aceite y por lo tanto la máxima utilización de la tierra fuller [12].

Cuando la arcilla se satura, esta puede regenerarse de forma térmica su reutilización, sin embargo, los costos son elevados para su reactivación, por lo cual se prefiere de recargar sus torres con arcilla nueva [12].

Debido a esta razón se recomienda usar bauxita ya que su eficiencia es mayor y por lo tanto puede recuperar 2 veces más aceite antes que se llegue saturar por completo [12].

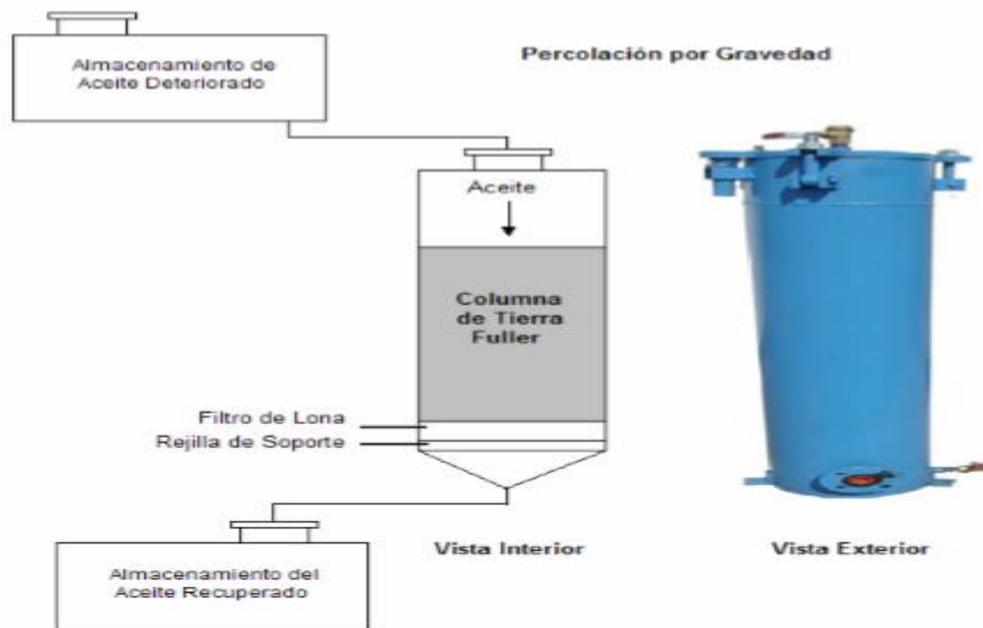


Figura 32: Sistema de Percolación con columnas acondicionadas  
Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos.  
M.G. Briones Martínez.

#### 4.7.2.3 Propiedades de las Arcillas Adsorbentes

Según [12] para el método de contacto se recomienda usar arcilla Atapulguita con una granulometría de 100 a 200 mesh RVM. Normalmente se utiliza la arcilla más fina de 200 mesh al menos que se necesite acelerar la velocidad del filtrado, para lo cual se utiliza la arcilla de 100 mesh.

Para el caso de purificación por el método de percolación la arcilla que se usa debe ser más granulada. Si la percolación es con cartuchos, se emplea una arcilla de 50 a 80

mesh RVM. Para el caso de las columnas acondicionadas, es recomendable usar una capa de arcilla Atapulguita de 30 a 60 mesh AA LVM o también Bauxita Porocel con granulometría de 20 a 60 mesh 2% V.M.

En la tabla N° 17 se compara las propiedades físicas y químicas de los dos tipos de tierra fuller: arcilla atapulguita y bauxita Porocel [12].

Tabla N°17: Propiedades químicas de las arcillas Absorbentes

<b>Composición Química</b>	<b>Arcilla Atapulguita</b>	<b>Bauxita Porocel</b>
SiO <sub>2</sub>	68%	9%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12%	78%
MgO	10,5%	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5%	8%
CaO	1,7%	-
TiO <sub>2</sub>	-	4%
Otros	2,8%	1%
Total	100%	100%

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos.  
M.G. Briones Martínez.

Tabla N°18: Propiedades físicas de las arcillas Absorbentes [12]

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	<b>Arcilla Atapulguita</b>	<b>Bauxita Porocel</b>
Gravedad Específica (g/cc)	2,5	3,2
Densidad (lb/p <sup>3</sup> )	31-33	56-58
Color	Crema Claro	Rojo Canela
Calor Específico (BTU/°F)	0,22	0,19

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos.  
M.G. Briones Martínez.

Para poder determinar la cantidad necesario de tierra fuller para recuperar un galón de aceite deteriorado, se debe considerar dos factores importantes: el tipo de arcilla que se usara y el grado de acidez del aceite a tratarse. A continuación, se presenta dos gráficos que son de gran utilidad al tomar esta decisión [12].

A manera de ejemplo si se quiere reducir el número de neutralización de 1,0 a 0,5 mg de KOH/ gm de aceite, se requieren aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de libra de arcilla atapulguita para recuperar un galón del aceite a tratarse tal como se presenta en la figura 33 [12].

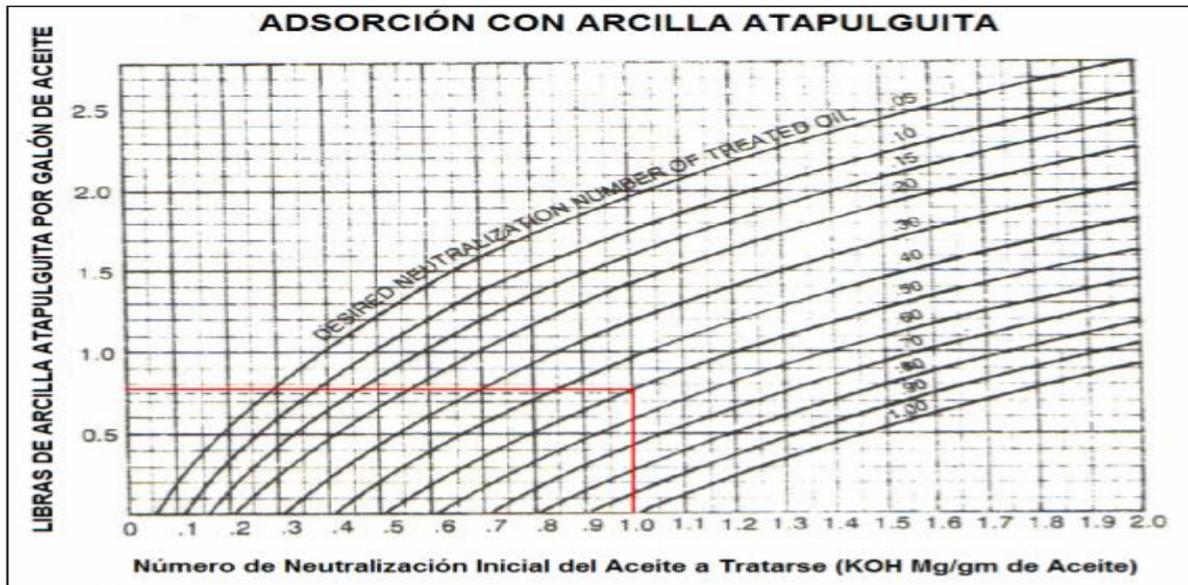


Figura 33: Adsorción con arcilla atapulguita

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos. M.G. Briones Martínez.

Asimismo, si se quiere reducir el número de neutralización de un aceite deteriorado de 1,0 a 0,2 mg de KOH/ gm de aceite, se requieren aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de libra de arcilla bauxita Porocel para recuperar un galón del aceite a tratarse tal como se presenta en la figura 29. [12].

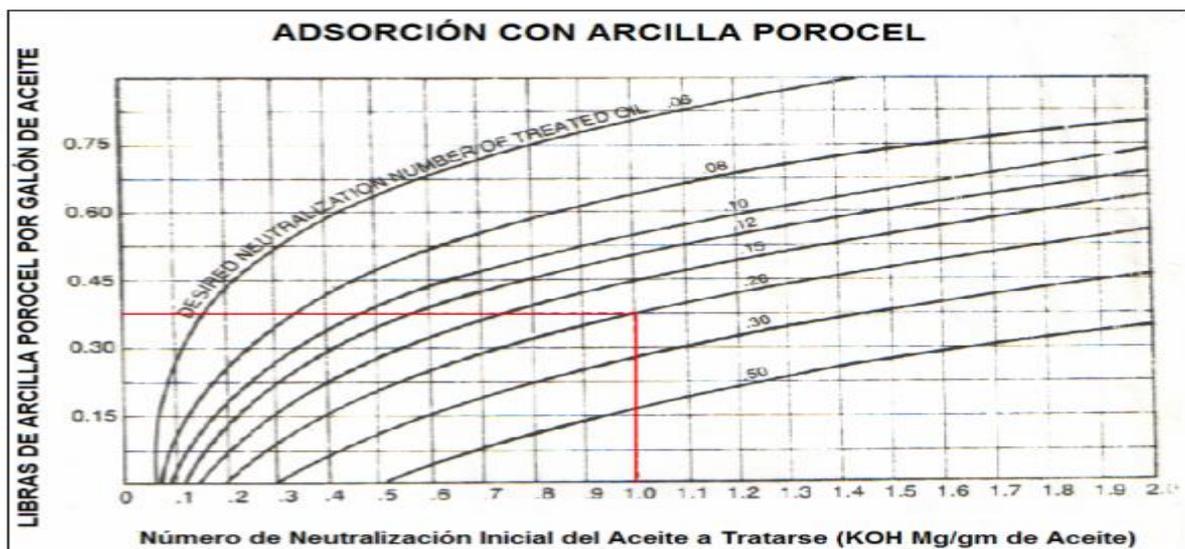


Figura 34: Adsorción con arcilla Porocel

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos. M.G. Briones Martínez.

Por lo tanto, se llega a concluir que la bauxita logra recuperar la misma cantidad de aceite que recupera la arcilla atapulguita pero empleado una menor cantidad de arcilla.

#### 4.7.3 Adición del Inhibidor de Oxidación

Cuando el aceite dieléctrico llega a cumplir con los parámetros para la reutilización, se procede a adicionar el inhibidor de oxidación al aceite dieléctrico, esto se agrega antes de ingresar al transformador para restaurar la pérdida de inhibidor que fue causado por el proceso de envejecimiento del aceite, su contacto con la tierra fuller y el efecto del calentamiento y vacío. El inhibidor se introduce transformador por medio de una válvula solenoide. El tanque está diseñado de tal forma que el 0,3% de inhibidor DBPC (2,6-ditercio-butil fenol) por peso del aceite, sea adicionado con exactitud en cada unidad [12].

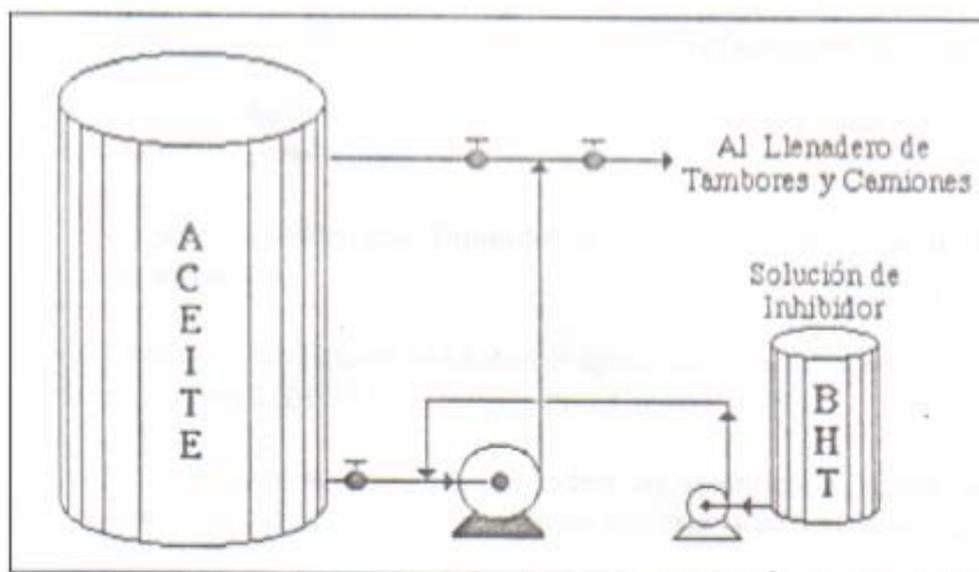


Figura 35: Instalación para añadir el inhibidor de oxidación

Fuente: Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos.  
M.G. Briones Martínez.

## 4.8 Bases Teórico Científicas

### 4.8.1 Para el diseño de reactores

**Fuente:** Transport phenomena, Brodkey y Hershey [24]

- **Para calcular las dimensiones generales del reactor**

**Ecuación 1:** las dimensiones del reactor y del impulsador

**Fuente:** Transport phenomena, Brodkey y Hershey [24]

- $H/Dt = 1$
- $E/Dt = 0,33$
- $W/Da = 0,2$
- $Da/Dt = 0,33$
- $G / Da = 0,25$
- $J/ Dt = 0,1$

- **Para calcular la potencia del agitador intervienen las siguientes ecuaciones:**

**Ecuación 2:** Obtención del número de Reynolds para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta.

**Fuente:** Transport phenomena, Brodkey y Hershey [24]

$$Re = \frac{N d^2 \rho}{\mu}$$

**Donde:**

$N =$  Velocidad angular  $m/s$

$d =$  Diametro del agitador

$\mu =$  Viscosidad del fluido en  $\frac{kg}{ms}$

$\rho =$  Densidad del fluido

**Ecuación 3.** Obtención del número de potencia**Fuente:** Transport phenomena, Brodkey y Hershey [24]

$$Np = \frac{P}{N^3 * d^5 * \rho}$$

**Donde:***P = Potencia (watts)**N = velocidad (rps)**d = diametro del agitador (m)**ρ = densidad de la mezcla ( $\frac{kg}{m^3}$ )*

- **Ecuaciones para hallar los esfuerzos en el eje del impulsor**

Para poder determinar el momento torsor y flector se usan las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 4:** Calculo de la potencia**Fuente:** Mecánica de materiales, Sexta edición. Beer, Russel

$$P = M_t * \omega$$

**Donde:***ω = velocidad angular en  $\frac{rad}{s}$* *M<sub>t</sub> = momento torsor (torque)Nm.**P = potencia, watts***Ecuación 5:** definición de la velocidad angular**Fuente:** Mecánica de materiales, Sexta edición. Beer, Russell

$$\omega = 2 * \pi * \frac{N}{60}$$

**Ecuación 6:** Para calcular la fuerza tangencial

**Fuente:** Mecánica de materiales, Sexta edición. Beer, Russell

$$F = \frac{M_t}{r}$$

**Donde:**

$F =$  Fuerza tangencial N

$r =$  radio m

**Ecuación 7:** Calculo del momento flector

**Fuente:** Mecánica de materiales, Sexta edición. Beer, Russell

$$M_f = F \cdot Le$$

**Donde:**

$M_f =$  Momento flector Nm.

$F =$  Fuerza N.

- **Ecuaciones para determinar el diámetro del eje**

**Ecuación 8:** El diámetro para un eje macizo con carga axial

**Fuente:** Diseño de ejes con la norma ASME.

$$D^3 = \frac{16}{\pi * S_s} * \sqrt{(K_f M_f)^2 + (K_t M_t)^2}$$

**Donde:**

$M_t =$  Momento de torsión, lb-pulg

$M_b =$  Momento de flexión, lb-pulg

$K_b =$  Valores del coeficiente del momento flector

$K_t =$  Valores del coeficiente del momento torsor

$S_s =$  Resistencia admisible

**Ecuación 9:** Resistencia admisible con fluencia a la tracción

**Fuente:** Diseño de ejes con la norma ASME, Frank Paul.

$$S_s = 0,30 * \sigma_F$$

**Donde:**

$S_s =$  resistencia admisible

$\sigma_F =$  esfuerzo de fluencia

**Ecuación 10:** Resistencia admisible con ruptura a la tracción

**Fuente:** Diseño de ejes con la norma ASME, Frank Paul.

$$S_s = 0,18 * \sigma_{rup}$$

**Donde:**

$S_s =$  Resistencia admisible

$\sigma_{rup} =$  Esfuerzo de ruptura

**4.8.2 Para el diseño del calentador y deshidratador**

Para poder hallar la potencia de la resistencia se emplean las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 11: Calor total necesario para calentar el aceite**

**Fuente:** Termodinámica, séptima edición, Yunes A. Cenguel, Michael A. Boles

$$Q_t = Q_{aceite} + Q_{perdida\ entorno}$$

**Donde:**

$Q_{aceite} =$  Es el calor necesario para calentar el aceite de  $T_1$  a  $T_2$

$Q_{perdido} =$  Es el calor que se pierde hacia el exterior

**Ecuación 12:** Primera ley de la termodinámica

**Fuente:** Termodinámica, séptima edición, Yunes A. Cenguel, Michael A. Boles

$$Q = m(h_2 - h_1)$$

**Donde:**

$m =$  es la masa de aceite equivalente en kg

$h_1 =$  es la entalpia del aceite para  $T_1$

$h_2 =$  es la entalpia del aceite para  $T_2$

**Ecuación 13:** Variación de entalpia

**Fuente:** Termodinámica, séptima edición, Yunes A. Cenguel, Michael A. Boles

$$(h_2 - h_1) = C_p(T_2 - T_1)$$

**Donde:**

$h_1 =$  Entalpia del aceite para  $T_1$

$h_2 =$  Entalpia del aceite para  $T_2$

$T_1 =$  temperatura del aceite en el inicio del proceso.

$T_2 =$  Temperatura al final del proceso

$C_p =$  Calor específico del aceite a presión constante

**Ecuación 14:** Potencia promedio de la resistencia

**Fuente:** Termodinámica, séptima edición, Yunes A. Cenguel, Michael A. Boles

$$P_{prom} = \frac{Q_{aceite}}{\Delta \text{ tiempo}}$$

**Donde:**

$Q_{aceite} =$  calor del aceite kJ

$\Delta t = \text{variación de tiempo}$

Para poder determinar las pérdidas de calor hacia el entorno se usaron las siguientes ecuaciones:

Fuente: Transferencia de calor y masa Yunes A. Cenguel

**Ecuación 15:** Calor perdido a través de convección para una capa cilíndrica

**Fuente:** Termodinámica, séptima edición, Yunes A. Cenguel, Michael A. Boles

$$Q_{conv,cil} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{total}}$$

**Donde:**

$R_{total}$  = red de resistencia por convección en una capa cilíndrica

$T_1$  = temperatura del aceite, °C

$T_2$  = temperatura del entorno, °C

**Ecuación 16:** Red de resistencias por convección en una capa cilíndrica

**Fuente:** Termodinámica, séptima edición, Yunes A. Cenguel, Michael A. Boles

$$R_{total} = \frac{1}{(4\pi * r_1^2)h_{ci}} + \frac{r_2 - r_1}{(4\pi * r_1 * r_2 * k)} + \frac{1}{(4\pi * r_2^2)h_e}$$

**Donde:**

$T_1$  = temperatura del aceite, °C

$T_2$  = temperatura del entorno, °C

$k$  = Conductividad térmica

$h_{ci}$  = coeficiente de transferencia de calor material  $\frac{W}{m^2 * C^\circ}$

$h_e$  = coeficiente de transferencia de calor material aire  $\frac{W}{m^2 * C^\circ}$

$r_2$  = radio exterior, m

$r_1$  = radio interior, m

### 4.8.3 Para el diseño del filtro de tierra fuller

**Ecuación 17:** Definición del diámetro de una partícula en términos del diámetro de una esfera

**Fuente:** Principios de operaciones unitarias, Alan S. Foust

$$\frac{A_p}{V_p} = \frac{\pi * D_{par}^2}{\pi * \frac{D_{par}^3}{6}}$$

**Donde:**

$A_p$  = area de la partícula

$V_p$  = volumen de la partícula

$D_{par}$  = diametro de la partícula

En donde se despeja y se tiene que el diámetro de la partícula es:

$$D_{par} = \frac{6}{A_p/V_p}$$

**Ecuación 18:** Definición de la esfericidad de la partícula

**Fuente:** Principios de operaciones unitarias, Alan S. Foust

$$\Psi = \frac{\pi * \left(\frac{6}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} * (D_{par}^3)^{2/3}}{6 * D_{par}^2}$$

**Donde:**

$\Psi$  = esfericidad de la partícula

$D_{par}$  = diametro de la partícula

**Ecuación 19:** Ecuación de Carman-Kozeny

**Fuente:** Principios de operaciones unitarias, Alan S. Foust

$$\frac{(-\Delta P) f g_c}{L} = k_2 * \frac{(1 - \epsilon)^2 * \mu * V_s}{\epsilon^3 D_{par}^2}$$

**Donde:**

$(-\Delta P)$  = caída de presión a través del lecho empacado,  $\frac{lb}{pie^2}$

$g_c$  = constante

$L$  = longitud del lecho, pies

$D_{par}$  = diámetro de partícula, pies

$V_s$  = velocidad superficial a una densidad promedio

$\epsilon$  = porosidad del lecho, adimensional

$N_{Re}$  = número de Reynolds promedio  $\mu$  = viscosidad

#### 4.8.4 Para el cálculo de bombas

Se calculará las pérdidas en tuberías y la potencia de la bomba a seleccionar.

**Ecuación 20:** Ecuación general de energía

**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

$$\left( \frac{P_1}{\omega} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right) + H_A - H_l = \left( \frac{P_2}{\omega} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right)$$

**Ecuación 21:** Caudal

**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

$$Q = \frac{\text{volumen } m^3}{\text{Tiempo}}$$

**Ecuación 22:** Velocidad en una tubería

**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

$$v = \frac{Q}{A}$$

**Ecuación 23:** Número de Reynolds

**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

$$RE = \frac{v * d}{u}$$

**Donde:**

$v$  = velocidad

$d$  = *diámetro de la partícula*

$u$  = *viscosidad*

**Ecuación 24:** Perdidas a la salida del depósito

**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

$$h_L = K * \frac{v^2}{2g}$$

**Donde:**

$v$  = velocidad

$k$  = *coeficiente de resistencia*

$g$  = *gravedad*

**Ecuación 25:** Perdidas en codos y T**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

Para el caso de codos y válvulas el coeficiente de resistencia (K) está definida por la siguiente ecuación, Donde  $Le/D$  y  $ft$  son constantes.

$$K = \frac{Le}{D} * ft$$

$$h_2 = \frac{Le}{D} * ft * \frac{v^2}{2g}$$

**Ecuación 26:** Perdidas por fricción**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

$$h_L = f * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

**Donde:***L = distancia total de tubería**d = diametro nominal de la tubería**f = factor de fricción***Ecuación 27:** Para calcular el factor de fricción que se usa para un flujo laminar**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

$$f = \frac{64}{NR}$$

**Ecuación 28:** Perdidas en válvulas**Fuente:** Robert L. Mott, Mecánica de fluidos

$$h_4 = ft * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

**Donde:**

$L$  = distancia total de tubería

$d$  = diámetro nominal de la tubería

$f_t$  = constante

$v$  = velocidad

$g$  = gravedad

**Ecuación 29:** Peso específico del aceite

$$\gamma = \delta * g$$

**Donde:**

$\delta$  = densidad

$g$  = gravedad

**Ecuación 30:** Potencia que transmite al fluido

$$Pot = h_A * \gamma * Q$$

**Donde:**

$h_A$  = pérdidas

$\gamma$  = peso específico

$Q$  = caudal

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Metodología

#### 5.1.1 Tipo y Nivel de Investigación

- **Tipo de Investigación**

La presente investigación reúne las condiciones metodológicas de una investigación aplicada, en razón, que se utilizaron conocimientos de Ingeniería, a fin de desarrollar el diseño del equipo para tratamiento y reutilización del aceite dieléctrico (PCB).

Según el método de estudio es de tipo descriptiva, debido a que con ella se debe medir las variables que intervienen en el estudio; las características, las actitudes, el comportamiento de los equipos investigados.

El estudio descriptivo se selecciona una serie de cuestiones y se mide cada una de ellas independientemente, para así describir lo que se investiga [17].

#### 5.1.2 Población y muestra

- **Población**

La población motivo de esta investigación está destinada para los transformadores aéreos de distribución de media tensión que se encuentran en la ciudad de Chiclayo.

- **Muestra**

La muestra utilizada en la presente investigación fue proporcionada por la empresa ELECTRONORTE S.A. brindando información sobre la situación actual de los transformadores de distribución en Chiclayo.

#### 5.1.3 Variables

##### 5.1.3.1 Variables independientes

Se consideraron como variables independientes aquellos aspectos de la máquina cuyos fundamentos fueron predispuestos antes de comenzar el diseño de la máquina, como capacidad, rango de tamaño, proceso interno [20].

##### 5.1.3.2 Variables dependientes:

Los factores de diseño decididos a partir de las variables dependientes como tipo de sistema de control, tipos de actuadores, capacidades internas (caudal, diámetro de tuberías, tipos y tamaños de tanques), etapas de potencia y estructura. Por otro lado, también pueden considerarse en este grupo, la cantidad de productos y residuos resultantes del proceso [20].

### 5.1.4 Diseño de la investigación

En el presente trabajo se desarrollará el modelo propuesto por Michel Jhosep French (1999), que se muestra en el siguiente esquema.

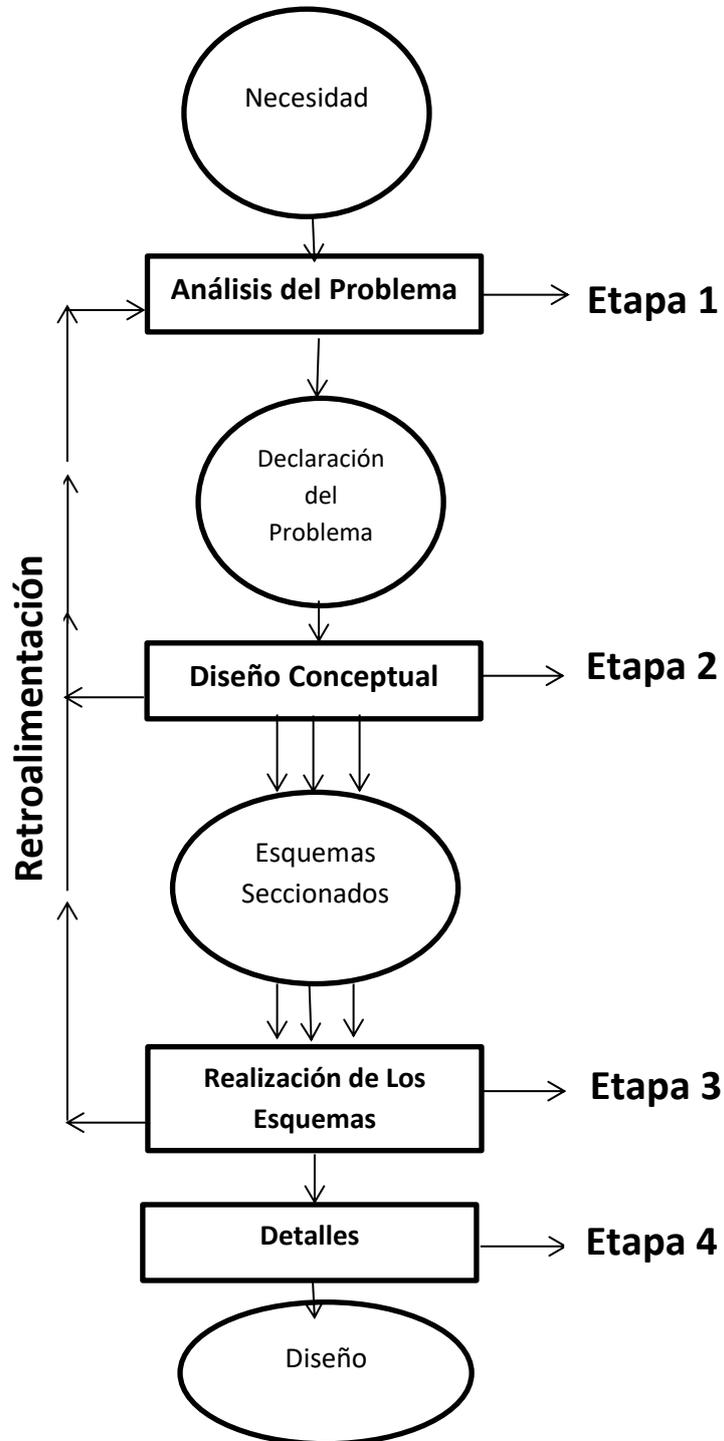


Figura 36: diseño de investigación  
fuente: Modelo de Michel Jhosep French

Los círculos son estados alcanzados y los rectángulos representan el trabajo en progreso

### **Etapa 1: Análisis del problema**

Comienza con la necesidad del tratamiento de los aceites dieléctricos contaminados con PCB que se encuentran presentes en los transformadores de distribución de la ciudad de Chiclayo. Lo que lleva a un planteamiento del problema.

- La máquina de tratamiento tiene por objetivo la descontaminación y recuperación del aceite dieléctrico con PCB.
- Es necesario que la maquina trabaje de acuerdo a los parámetros estandarizados.
- Se debe tener en cuenta el fácil manejo con respecto a factores de seguridad, riesgos, impacto ambiental.

### **Etapa 2: Diseño conceptual**

Durante la fase de diseño conceptual, se generan varios conceptos para la búsqueda de las soluciones al problema planteado en la primera etapa.

El diseño conceptual constará de 4 partes:

1. Eliminación del PCB
2. Reacondicionamiento del aceite dieléctrico
3. Recuperación del aceite dieléctrico
4. Reincorporación de aditivos

Estos conceptos serán sobre las distintas tecnologías que se usan para eliminar el PCB del aceite dieléctrico, los diferentes métodos que se usan para la regeneración y recuperación del aceite dieléctrico.

### **Etapa 3: Realización de esquemas**

En esta fase las alternativas planteadas como posible solución se transforman en una representación más concreta para permitir la evaluación y comparación de los diferentes conceptos generados.

El concepto de diseño elegido solidifica dando la solución al problema planteado, con lo que ya tenemos un diseño definitivo para realizar las dimensiones correctas de acuerdo a los parámetros de diseño establecidos.

### **Etapa 4: Detalles**

En esta última etapa se decidirá una gran cantidad de puntos pequeños pero esenciales para poder brindar la calidad de este trabajo.

En esta etapa se definirán los parámetros necesarios para que el diseño de la maquina llegue a cumplir con los requisitos planteado.

## **5.2 Diagnostico de la situación actual de los transformadores de distribución de la ciudad de Chiclayo**

La información propuesta fue proporcionada por la empresa Electronorte S.A. Donde se realizó un análisis de la información, con el fin de obtener un número de transformadores clasificados por su nivel de tensión y potencia.

Con los transformadores ya clasificados será más fácil poder determinar el número total de Kg de aceites contenidos en los transformadores de distribución de Chiclayo.

### 5.2.1 Recolección de datos

Tabla N° 19: Clasificación de transformadores por nivel de tensión primaria 10 KV

Nivel de tensión	Potencia KVA	N° de transformadores	Tiene aceite (SI) (NO)	Peso de aceite (Kg)	Peso de aceite total (Kg)
10 KV	5	3	SI	30	90
	10	5	SI	30	150
	15	15	SI	70	1050
	25	10	SI	65	650
	37.5	18	SI	65	1170
	50	9	SI	90	810
	75	5	SI	85	425
	100	18	SI	112	2016
	125	1	SI	115	115
	150	2	SI	156	312
	160	23	SI	156	3588
	200	6	SI	194	1164
	250	12	SI	223	2676
	630	2	SI	541	1082
	1000	1	SI	896	896
	2X50 VA	1	SI	-	-
	2X50VA	1	SI	-	-
	3X50 VA	2	SI	-	-
	(en blanco)	2	SI	-	-
	<b>TOTAL</b>	<b>136</b>		<b>TOTAL</b>	<b>16194</b>

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 20: Clasificación de transformadores por nivel de tensión primaria 10 – 22,9 kV.

Nivel de tensión	Potencia KVA	N° de transformadores	Tiene aceite (SI) (NO)	Peso del aceite (Kg)	Peso de aceite total (Kg)
10 - 22,9 kv	10	1	SI	35	35
	15	1	SI	60	60
	25	1	SI	70	70
	37,5	1	SI	80	80
	50	1	SI	119	119
	75	3	SI	100	300
	100	4	SI	167	668
	160	5	SI	208	1040
	250	3	SI	335	1005
	2X50 VA	1	SI	-	-
	<b>TOTAL</b>	<b>21</b>		<b>TOTAL</b>	<b>3377</b>

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 21: Clasificación de transformadores por nivel de tensión primaria de 13,2 kV

Nivel de tensión	Potencia KVA	N° de transformadores	Tiene aceite (SI) (NO)	Peso del aceite (Kg)	Peso de aceite total (Kg)
13,200	5	1	SI	30	30
	10	1	SI	30	30
	15	5	SI	70	350
	25	1	SI	65	65
	37,5	1	SI	65	65
	40	2	SI	70	140
	50	2	SI	70	140
	100	2	SI	85	170
		(en blanco)	1	SI	-
	<b>TOTAL</b>	<b>16</b>		<b>TOTAL</b>	<b>990</b>

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 22: Clasificación de transformadores por nivel de tensión primaria de 13,2 -10 kV

Nivel de tensión	Potencia KVA	N° de transformadores	Tiene aceite (SI) (NO)	Peso de aceite (Kg)	Peso de aceite total (Kg)
13,2-10 kv	50	1	SI	70	70
	150	1	SI	105	105
	<b>TOTAL</b>	<b>2</b>		<b>TOTAL</b>	<b>175</b>

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 23: Clasificación de transformadores por nivel de tensión primaria de 13,2 – 22,9 kv

Nivel de tensión	Potencia KVA	N° de transformadores	Tiene aceite (SI) (NO)	Peso de aceite (Kg)	Peso de aceite total (Kg)
13,2 - 22,9 kv	50	1	SI	90	90
	25	1	SI	70	70
	<b>TOTAL</b>	<b>2</b>		<b>TOTAL</b>	<b>160</b>

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 24: Clasificación de transformadores por nivel de tensión primaria de 22,9 kv

Nivel de tension	Potencia KVA	N° de transformadores	Tiene aceite (SI) (NO)	Peso de aceite (Kg)	Peso de aceite total (Kg)
22,9 kv	5	1	SI	35	35
	10	4	SI	35	140
	15	1	SI	60	60
	25	13	SI	70	910
	37,5	4	SI	80	320
	50	5	SI	119	595
	75	3	SI	100	300
	100	5	SI	167	835
	160	1	SI	208	208
	2X50 VA	2	SI	-	-
	3 x 50 VA	2	SI	-	-
	3X50 VA	1	SI	-	-
	(en blanco)	1	SI	-	-
	<b>TOTAL</b>	<b>43</b>		<b>TOTAL</b>	<b>3403</b>

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 25: Clasificación de transformadores por nivel de tensión primaria de 22,9 – 10 kv

Nivel de tensión	Potencia KVA	N° de transformadores	Tiene aceite (SI) (NO)	Litros	Litros totales
22,9 - 10 kv	5	1	SI	35	35
	10	1	SI	35	35
	15	1	SI	60	60
	37,5	2	SI	80	160
	40	1	SI	119	119
	50	7	SI	119	833
	75	3	SI	100	300
	100	2	SI	167	334
	160	6	SI	208	1248
	200	1	SI	236	236
	630	1	SI	584	584
	800	1	SI	707	707
	1x50 VA	1	SI	-	-
	2X50 VA	3	SI	-	-
	3x50 VA	1	SI	-	-
(en blanco)	1	SI	-	-	
	<b>TOTAL</b>	<b>33</b>		<b>TOTAL</b>	<b>4651</b>

Fuente: Electronorte S.A.

Teniendo como resultado:

Tabla N° 26: Peso total del aceite de los transformadores de tensión primaria 10kv, 13,2 kv , 22,9 kv

Nivel de tensión	Peso del aceite total (kg)
10 kv	16194
10 kv – 22,9 kv	3377
13,2 kv	990
13,2 kv – 10 kv	175
13,2 kv – 22,9 kv	160
22,9 kv	3403
22,9 kv – 10 kv	4651
<b>TOTAL</b>	<b>28,950 Kg</b>

Fuente: Electronorte S.A.

Para determinar el rango de aceite dieléctrico (PCB) que la maquina va a tratar, fue importante poder hacer un análisis comparativo sobre el número de transformadores por los Kg de aceite.

Tabla N° 27: Clasificación del número de transformadores (nivel de tensión de 10 kva) por kg de aceite.

<b>Nivel de tension 10 Kva</b>		
<b>Potencia KVA</b>	<b>N° de transformadores</b>	<b>Peso de aceite (Kg)</b>
5	3	30
10	5	30
15	15	70
25	10	65
37,5	18	65
50	9	90
75	5	85
100	18	112
125	1	115
150	2	156
160	23	156
200	6	194
250	12	223
630	2	541
1000	1	896

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 28: Clasificación del número de transformadores (nivel de tensión de 10-22,9 kv) por kg de aceite.

<b>Nivel de tension 10-22,9 kv</b>		
<b>Potencia KVA</b>	<b>N° de transformadores</b>	<b>Peso del aceite (Kg)</b>
10	1	35
15	1	60
25	1	70
37,5	1	80
50	1	119
75	3	100
100	4	167
160	5	208
250	3	335

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 29: Clasificación del número de transformadores (nivel de tensión de 13,2kv) por kg de aceite.

<b>Nivel de tension 13,2 kv</b>		
<b>Potencia KVA</b>	<b>N° de transformadores</b>	<b>Peso del aceite (Kg)</b>
5	1	30
10	1	30
15	5	70
25	1	65
37,5	1	65
40	2	70
50	2	70
100	2	85

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 30: Clasificación del número de transformadores (nivel de tensión 22,9-10 kv) por kg de aceite.

<b>Nivel de tension 22,9 - 10 kv</b>		
<b>Potencia KVA</b>	<b>N° de transformadores</b>	<b>Peso de aceite (Kg)</b>
5	1	35
10	1	35
15	1	60
37,5	2	80
40	1	119
50	7	119
75	3	100
100	2	167
160	6	208
200	1	236
630	1	584
800	1	707

Fuente: Electronorte S.A.

Tabla N° 31: Clasificación del número de transformadores (nivel de tensión 22,9kv) por kg de aceite.

<b>Nivel de tension 22,9 kv</b>		
<b>Potencia KVA</b>	<b>N° de transformadores</b>	<b>Peso de aceite (Kg)</b>
5	1	35
10	4	35
15	1	60
25	13	70
37,5	4	80
50	5	119
75	3	100
100	5	167
160	1	208

Fuente: Electronorte S.A.C

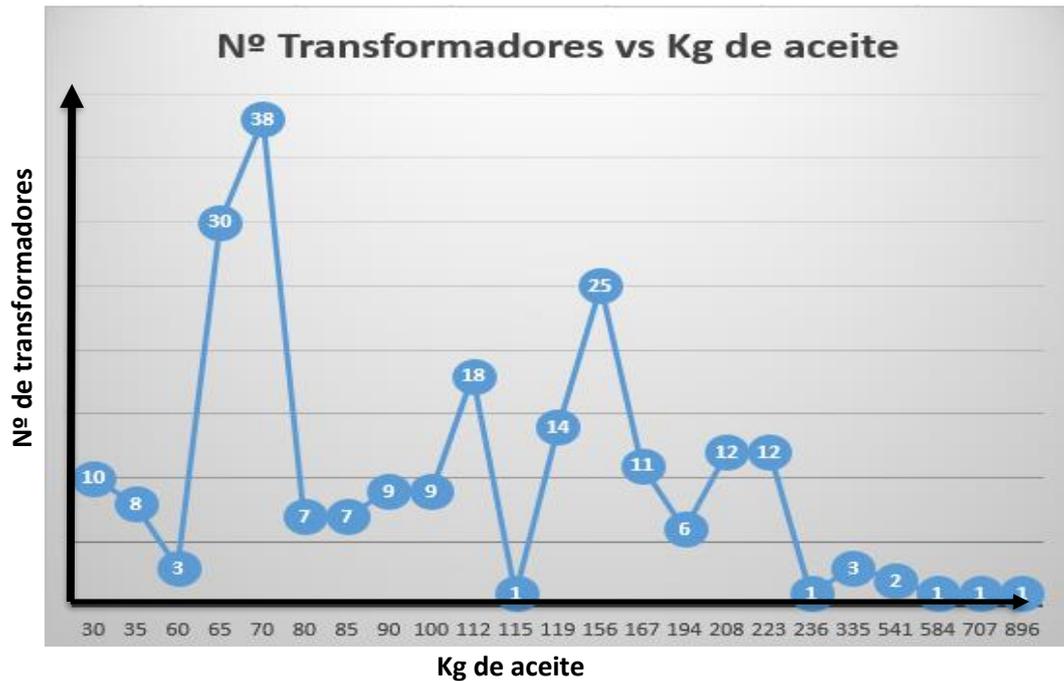
Para poder determinar el volumen de aceite que va a tratar la máquina, se realizó un análisis con el fin de ver la cantidad de transformadores que hay según los kg de aceite.

Tabla N° 32: Numero de transformadores por kg de aceite dieléctrico.

<b>Kg de aceite</b>	<b>N° de transformadores</b>
30	10
35	8
60	3
65	30
70	38
80	7
85	7
90	9
100	9
112	18
115	1
119	14
156	25
167	11
194	6
208	12
223	12
236	1
335	3
541	2
584	1
707	1
896	1

Fuente: Elaboración propia

Numero de transformadores vs Kg de aceite



Fuente: Elaboración propia

El grafico muestra que hay mayor número de transformadores que están en el rango de 70 kg y 150 kg, para poder satisfacer con la demanda del mercado la maquina será diseñada de forma que pueda tratar estos rangos de aceite.

Analizando el grafico que el mayor número de transformadores se encuentran sacamos el promedio total de kg que serán tratados en la máquina, lo cual indica que la maquina va a tratar a los transformadores de distribución aéreos de monofásico (25, 37,5 , 75) KVA y trifásicos (30 , 45,75)KVA.

Según el grafico se tratarán transformadores con aceite de un rango de 30 kg a 160 kg, cubriendo con la mayor demanda.

## **5.3 ETAPA 2: Diseño conceptual de elementos o partes**

### **5.3.1 Descripción de los procesos:**

Para poder lograr con el objetivo principal, esta máquina consta de 4 procesos establecidos, por lo cual se evaluó las distintas alternativas de métodos y tecnologías que se deberán emplear en cada proceso.

A continuación, se describe de manera general los procesos.

- **Proceso 1: Eliminación del PCB**

En el primero proceso se llevará a cabo la eliminación del PCB contenido en el aceite dieléctrico. El producto final de este proceso es un aceite dieléctrico deteriorado libre de PCB.

- **Proceso 2: Reacondicionamiento**

El reacondicionamiento es un proceso de extracción de contaminantes, en donde se buscará la eliminación de la humedad y gases disueltos en el aceite dieléctrico.

- **Proceso 3: Recuperación.**

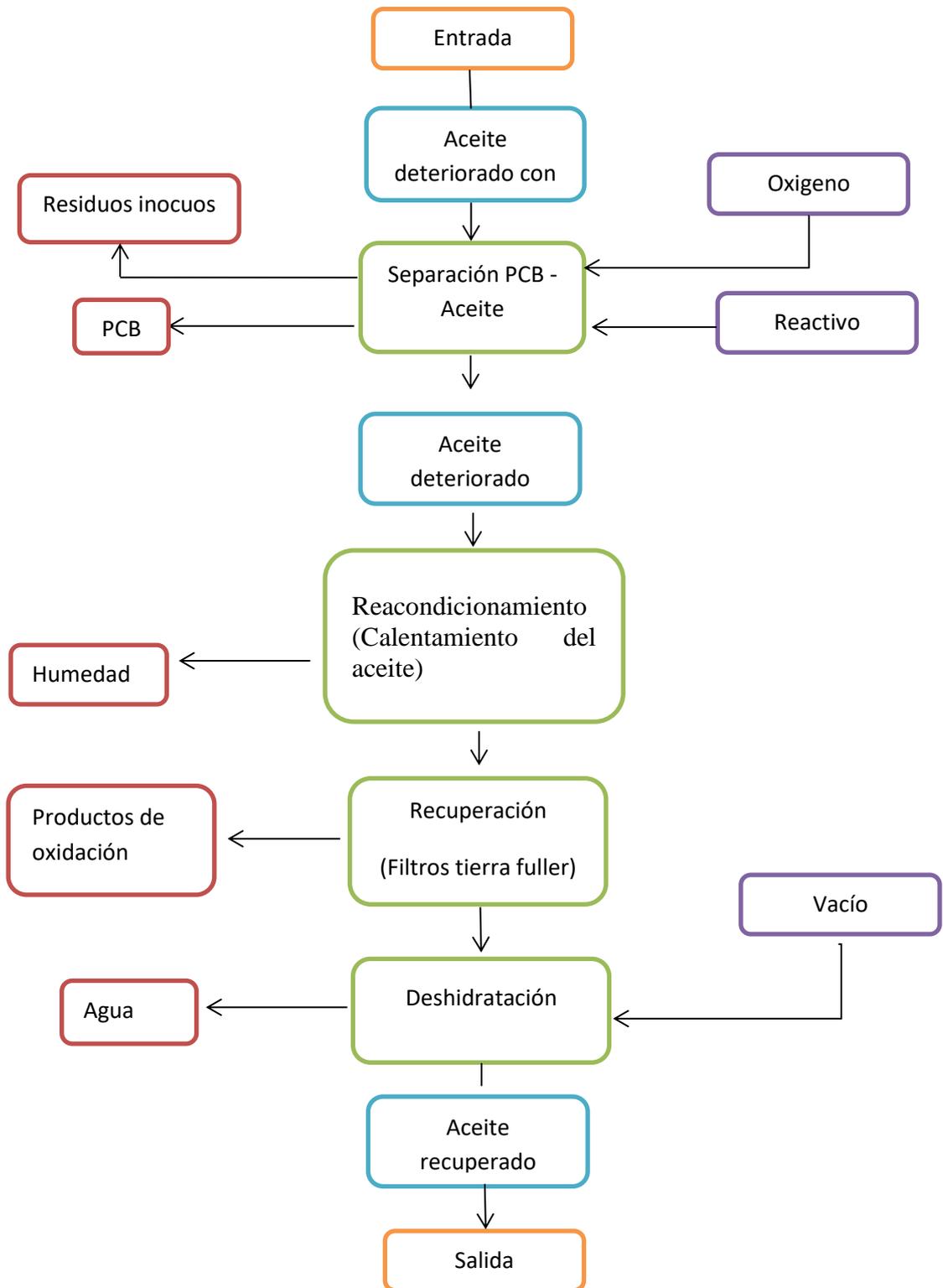
Este proceso elimina tanto los agentes contaminantes ácidos, los lodos y, en general, los productos de oxidación, tanto solubles como no solubles en el aceite mediante filtrado a través de tierras, se optimizan las propiedades eléctricas del aceite, de tal forma de recuperar las características aislantes.

Sabiendo los objetivos principales que tienen cada proceso, se evaluó las distintas alternativas que se podrían usar en cada proceso, la elección de los métodos y tecnología se basó bajo criterios técnicos y económicos.

- **Proceso 4: Reincorporación de aditivos**

En este proceso al aceite tenemos a un aceite dieléctrico recuperado libre de PCB, se le agregará los aditivos necesarios para su reutilización como material dieléctrico.

### Diagrama del proceso de la máquina para recuperación de aceite dieléctrico (PCB)



Fuente: Elaboración propia

Para la selección del método de eliminación del PCB, tomamos como referencia una encuesta de PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente) realizada a empresas que se dedican a la descontaminación de aceite dieléctrico (PCB), en esta encuesta se muestra las diferentes tecnologías usadas para la eliminación de PCB en aceite y en los transformadores [18].

El único criterio en que se basará la selección es que esta tecnología permita la reutilización del aceite dieléctrico.

Tabla N° 33: Tecnología de destrucción de PCB: TRANSFORMADORES

<b>Nombre de la compañía</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Reutilización del transformador</b>	<b>Recuperación del metal</b>
ABB	Limpieza con solvente ( también retroalimentado)	Si	Si
AMEC GeoMelt	Vitrificación	No	No
Aprochim	Limpieza con solvente seguida de combustión a HCL	No	Si
Bilger	Reacción con sodio tras trituración	No	No
Cintec	Limpieza con solvente	No	Si
Cleanaway	Limpieza con solvente + Incineración	No	Si
Eco Logic	Hidrogenación a altas temperaturas	No	Si
Fluidex	Retroalimentación	Si	No
Grosvenor Power	Retroalimentación	Si	No
Manitoba Hydro	Retroalimentación	Si	No
S D Myres	Retroalimentación	No	Si
Ontario Power	Lavado con solvente	Si	No
Orion	Lavado con solvente + incineración	No	Si
Petrochimtekhnologi	Por destrucción de plasma	No	Si
Powertech	No aplicable	-	-
Sanexen (DCR)	Lavado con solvente	No	Si
Safety-Kleen	Limpieza con solvente	No	Si
Shanks	Incineración parcial con recuperación del metal	No	Si
Shinko Pantec	Solvente + retroalimentación	No	Si
TASSCO	Retroalimentación	Si	No
Tredi	Limpieza con solvente + Incineración	Si	No

Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente

Basándonos en las tecnologías que usan las diferentes empresas para la recuperación del transformador, los métodos más usados son de descontaminación con solvente y el retroalimentado.

La única tecnología que cumple con el criterio de la reutilización del transformador es el retroalimentado o retroalimentación.

### **5.3.2 Selección de tecnología y métodos para la recuperación del aceite dieléctrico.**

- **Selección del tipo de tecnología para la destrucción de PCB: ACEITE DIELECTRICO**

Según [18] estas tecnologías que presenta como respuesta a la encuesta de PNUMA, usan métodos para la descontaminación, métodos de destrucción fisicoquímicos y métodos químicos, la incineración no está incluida. [18]:

Entre las tecnologías que se han descrito anteriormente se tiene Los métodos químicos como clorólisis, deshidrohalogenación catalítica, reacciones con sales fundidas, reacciones con ozono y reducciones con metales alcalinos quedan descartadas debido a los elevados costos que representan estas tecnologías, los reactivos costosos, atmósferas inertes, controles estrictos de temperatura, aparatos complejos y elevado consumo de energía, entre otros [16].

Se descartó el uso de la tecnología basada en métodos térmicos ya que buscamos la reutilización del aceite dieléctrico y usar métodos térmicos implica la eliminación de este.

En la siguiente tabla muestra las diferentes tecnologías que usan las empresas para la destrucción de PCB en aceite.

Tabla N° 34: Tecnologías de destrucción de PCB: ACEITE

Nombre de la compañía	Tecnología	Reutilización del aceite
ABB	No aplicable	-
AMEC GeoMelt	Vitrificación	No
Aprochim	Concentración por solvente + conversión a HCL	Si
Bilger	Sodio	Si
Cintec	No aplicable	-
Cleanaway	Incineración	No
Eco Logic	Hydrogenación	No
Elf Atochem	Combustión a HCL	No
Fluidex	Sodio	Si
Grosvenor Power	Descloración	Si
Manitoba Hydro	Sodio	Si
S D Myres	Descloración	Si
Ontario Power	Sodio	Si
Orion	No aplicable	-
Papusha Rocket	Alta temperatura termoquímica	No
Petrochimtekhologii	Plasma	No
Powertech	Sodio	Si
Sanexen (DCR)	Sodio	Si
Safety-Kleen	Sodio	Como combustible
Shanks	Incineración	No
Shinko Pantec	Sodio	Si
TASSCO	Sodio	Si
Tredi	Incineración	No

Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente

La mayoría de empresas usan tecnología de descloración o decloración lo cual brindan la reutilización del aceite que es el principal objetivo de este trabajo.

El tratamiento químico es utilizado de forma general para destruir PCB que se encuentran disueltos en aceites dieléctricos más que para la degradación de PCB puros. A continuación, algunas ventajas de este tratamiento frente a los otros métodos de eliminación de PCB.

- Es más seguro, no genera emisiones al medio ambiente.
- El aceite puede ser regenerado y reutilizado, debido a que los reactivos no afectan la naturaleza del aislante.

Se escogió la decloración, debido a la cantidad de información que existe sobre este método, además ofrecer facilidades de montaje tanto a nivel de laboratorio como a nivel de planta piloto, y puede pensarse en un proceso a mayor escala más adelante [16].

Tabla N° 35: Matriz morfológica para la selección de métodos y tecnologías para trata el aceite dieléctrico con PCB

<b>CRITERIOS DE PONDERACION</b>		
<b>Criterio</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Facilidad de instalación	F.i	1
Facilidad de operación	F.m	1,5
Seguridad	S	2,5
Costos bajos	C	1,5
Eficiencia	E	2,5
Piezas Estándar	P	1
<b>TOTAL</b>		<b>10</b>

Fuente: Elaboración propia

**Criterios de ponderación:**

- **Facilidad de instalación:** Los métodos y tecnología sean fáciles para la implementación.
- **Facilidad de operación:** En este criterio lo que se busca es que las tecnologías y los métodos no sean tan complejos y complicados para el operario.
- **Seguridad:** Los métodos y tecnologías escogido debe brindar la confianza que no ocurrirá ninguna falla.
- **Costos bajos:** Es el valor más bajo.
- **Eficiencia:** En este criterio se evalúa que estos métodos y tecnologías a seleccionar sean eficientes y cumplan con los requerimientos.
- **Piezas estándar:** En este criterio también es importante que el material a elegir sea accesible, este dentro del mercado del país.

Tabla N° 36: Selección de método para la descontaminación del transformador

<b>Método</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Desventaja</b>
<b>Extracción por Solvente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Descontaminación completa del PCB.</li> <li>-Descontaminación fácil de las superficies metálicas.</li> <li>- Se llega a recuperar la mayoría de partes metálicas.</li> <li>- Trata PCB de muy alta concentración (&gt;50,000 ppm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se destruye el transformador, con la posibilidad de recuperar la mayoría de partes metálicas.</li> <li>- No se recuperan los equipos solo parte de metales</li> <li>- Se retira el transformador de servicio.</li> <li>-Instalaciones fijas.</li> <li>-Se tienen que incinerar los materiales porosos</li> </ul>
<b>Retrofilling</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite la utilización del equipo una vez reclasificado (descontaminado).</li> <li>- Se puede usar tanto en plantas fijas, como in situ.</li> <li>- Trata PCB con bajas medias y altas (&lt;50,000 ppm).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La destrucción no es completa.</li> <li>- Los PCB se encontrarán en los materiales porosos.</li> <li>- Difusión lenta de los contaminantes en aceite limpio.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 37: Selección de Tecnología de declorinación para la eliminación del PCB

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b><u>Proceso Goodyear</u></b> (PCB con sodio-naftaleno)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La presencia del metal de sodio libre en el medio de reacción mejora la efectividad de la reacción de declorinación.</li> <li>-Se usa cualquier gas inerte conveniente.</li> <li>-La reacción entre el naftaleno sódico y los PCB se lleva a cabo rápidamente a T° ambiente</li> <li>-Método eficaz y de acción rápida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La reacción se efectúa bajo una atmósfera inerte.</li> <li>-Costoso.</li> <li>-Reactivos son difíciles de preparar</li> <li>-Se requiere equipos especializados.</li> <li>-Inestables para su almacenamiento.</li> <li>-Sensibles al oxígeno y al agua.</li> </ul>
<b><u>Proceso KPEG</u></b> (PCB con un polietilengliconato de potasio o sodio)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se genera gas de hidrógeno, eliminando un posible peligro.</li> <li>-Cualquiera de los hidróxidos se pueden usar.</li> <li>-Es económico.</li> <li>-La mezcla ocurre a T° ambiente.</li> <li>-No se requiere control de T° o equipos especializados.</li> <li>-Facilidad de operación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Las principales características que se tienen que tener en cuenta es la de corrosión e higroscopia.</li> <li>-Es un 3% menos eficiente que el proceso Goodyear.</li> </ul>

<p><b><u>KOH</u></b>  <b><u>Absorbente</u></b>          PCB con KOH (o NaOH) –          Adsorbente (alúmina activada).</p>	<p>-Se mezcla el aceite con el hidróxido de metal alcalino en discontinuo.          -Pasa por una columna filtrante adsorbente.          -Facilidad de operación.</p>	<p>-Es deficiente.          -El lodo satura el adsorbente.          -Costo adicionales en comprar el absorbente (alúmina activada)</p>
--	---	--

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 38: Selección del método para separar solidos

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Centrifugación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separa solidos de líquidos de diferentes densidades.</li> <li>- Imprime a la mezcla con una fuerza mayor que la gravedad.</li> <li>- La fuerza centrífuga origina la sedimentación de los sólidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de más equipos que en la decantación.</li> <li>- Mayor costo que la decantación</li> </ul>
<b>Decantación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separa los líquidos insolubles entre sí.</li> <li>- Sencillo</li> <li>- Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No logra separar una mezcla de líquido y sólidos livianos.</li> <li>- El tiempo de decantación es mucho.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 39: Selección de método para el reacondicionamiento

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Calefacción directa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sencillo</li> <li>- Calefacción por medio de resistencias</li> <li>- Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El tiempo de calentamiento es largo para obtener un buen resultado.</li> <li>- Si la temperatura supera el límite se produce una fuerte oxidación.</li> <li>- Las pérdidas de aceite son considerables.</li> </ul>

<b>Calentamiento realizado por medio de gases</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sencillo</li> <li>- Calefacción por medio de gases</li> <li>- Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se corre el peligro de que se produzcan calentamiento en zonas específicas.</li> <li>- El aceite tiene una mala conductividad térmica.</li> <li>- Produce descomposiciones que reducen la estabilidad química de la misma.</li> </ul>
<b>Centrifugación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sencillo</li> <li>- Usa un tambor giratorio</li> <li>- Separa el aceite del agua por peso específico.</li> <li>- Usa aceite caliente a 60°</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La centrifugación se debe realizar por un periodo de tiempo prolongado, hasta que el aceite quede libre de impurezas.</li> <li>- Poca eficiencia</li> </ul>
<b>Deshidratación por termo-vacío</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora las deficiencias de los métodos anteriores.</li> <li>- Método generalizado y eficiente.</li> <li>- Evaporación en vacío a moderadas temperaturas.</li> <li>- Niveles más bajos de humedad</li> <li>- Temperatura alta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Causa la pérdida de los inhibidores de oxidación.</li> <li>- Equipos más complejos</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 40: Selección de método para la recuperación

<b>Método</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Desventaja</b>
<b>Por contacto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sencillo</li> <li>-Para bajos volúmenes de aceite.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Este método es lento.</li> <li>-Necesita hacer varias repeticiones.</li> <li>-Es costosa separar la tierra fuller.</li> <li>-Trata una cantidad inferior de aceite dieléctrico.</li> </ul>
<b>Por percolación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reducción de trabajo manual</li> <li>-Sustitución de los cartuchos usados es simple y rápida</li> <li>-Alta calidad de desprendimiento de contaminantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requiere un adecuado control sobre la cantidad de aceite que pasa a través del cartucho antes de ser cambiado.</li> <li>-Proceso de larga duración para tener óptimos resultados.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 41: Selección de unidad para percolación

<b>Tipo de unidad de percolación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Unidad de Tipo Cartucho</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El flujo del aceite es horizontal.</li> <li>- La capa que absorbe es muy fina</li> <li>-La granulometría del adsorbente se usa para mayor facilidad de adsorción y al mismo tiempo el flujo</li> <li>- Se combinan dos funciones: El tratamiento con tierra fuller y la filtración por pulimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si la capa de tierra fuller no es lo suficientemente fina ocurre caídas de presión.</li> <li>- Mayor control en la cantidad de aceite filtrado antes de ser cambiado.</li> <li>- El adsorbente se satura.</li> </ul>
<b>Unidad Tipo Torre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flujo verticalmente del aceite.</li> <li>- Se pueden acondicionar filtros con tierra fuller suelta.</li> <li>- Se puede rellenar de forma manual y al vacío.</li> <li>- Abertura inferior para rápida descarga.</li> <li>- Flujo rápido sin caída excesiva de presión.</li> <li>- Puede utilizarse un sistema de dos o más columnas unidas con tubería.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recomendable usar una bomba de vacío para el relleno directamente de los sacos que contiene tierra fuller.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 42: Selección de métodos y tecnologías bajo criterios de técnicos y económicos

Aspecto	Alternativas	CRITERIOS DE EVALUACIÓN						
		F.i (1)	F.o (1,5)	S (2,5)	C (1,5)	E (2,5)	P (1)	TOTAL
Metodo de declornación	Proceso Goodyear	0,5	1	1,5	1	2,5	0,5	7
	proceso alternativo	0,5	1	1,5	1	1,5	0,5	6
	Proceso KPEG	1	1,5	2,5	1,5	2	1	9,5
	PROCESO KOH - Absorbente	0,5	1,5	2,5	1	1	0,5	7
Aspecto	Alternativas	CRITERIOS DE EVALUACIÓN						
		F.i (1)	F.o (1,5)	S (2,5)	C (1,5)	E (2,5)	P (1)	TOTAL
Metodo de reacondicionamiento	Calefacción directa	1	1	1,5	1,5	1,5	1	7,5
	Calefacción por medio de gases	1	1	1,5	1,5	1,5	1	7,5
	Centifugación	1	1	2	1,5	1,5	1	8
	Deshdratación por termo-vacio	0,5	1,5	2,5	1	2,5	0,5	8,5
Aspecto	Alternativas	CRITERIOS DE EVALUACIÓN						
		F,i (1)	F.o (1,5)	S (2,5)	C (1,5)	E (2,5)	P (1)	TOTAL
Metodo de recuperación	Por contacto	1	1	2	1,5	2	1	8,5
	Por percolación	0,5	1,5	2,5	1	2,5	1	9
Tipo de unidad de percolación	Tipo cartucho	1	0,5	2	1,5	2	1	8
	Tipo torre	1	1	2,5	1	2,5	1	9

Fuente: Elaboración propia

### **5.4 ETAPA 3: Realización de los esquemas**

Una vez seleccionado las tecnologías y métodos que se emplearan en las distintas fases de la máquina, se pasó a describir de manera detallada cada proceso que intervienen en la maquina regeneradora de aceite dieléctrico (PCB) con el fin de poder tener estructurada el proceso total.

#### **5.4.1 Proceso de declorinación del aceite**

Para la fase de declorinación se estableció que el método para la separación del PCB en el aceite dieléctrico es el Proceso KPEG el cual usara un reactivo de hidróxido de un metal alcalino (sodio) y un PEG.

El proceso de declorinación contará con 2 reactores:

En el primer reactor se hará la reacción de un hidróxido de metal alcalino y un PEG. En la segunda parte una bomba succionará el aceite del transformador y lo enviará hacia un filtro de 20 micrómetros para evitar los productos obtenidos el deterioro del aceite, luego el aceite dieléctrico (PCB) ingresa al segundo reactor, el reactivo generado en el primer reactor ingresará al segundo reactor por gravedad para iniciar la descomposición de los compuestos orgánicos halogenados disueltos en el aceite dieléctrico.

Las sustancias que quedan después de la reacción se completan por separado en dos fases, en una tenemos un aceite libre de compuestos orgánicos halogenados y en otra los productos de la reacción, esta mezcla se separará por centrifugación.

##### **5.4.1.1 Reactivos**

La descomposición de compuestos orgánicos halogenados puede llevarse a cabo de manera eficiente y eficaz usando un reactivo producido por la reacción de un hidróxido de metal alcalino, un poliglicol o un poliglicol monoalquil éter y oxígeno. El término "poliglicoles", como se usa, pretende significar polímeros de alcoholes dihidricos [22].

Cualquiera de los hidróxidos de metal alcalino puede usarse en la práctica del método incorporado en este aspecto de la presente invención. Se prefieren los hidróxidos de litio, sodio y potasio o mezclas de los mismos debido a su fácil disponibilidad y costo relativamente bajo. De estos, el hidróxido de sodio es particularmente preferido porque es menos costoso que los demás y produce un reactivo de descomposición altamente reactivo.

Se ha determinado que el oxígeno es un tercer reactivo necesario para la formación del reactivo de descomposición. Cuando el hidróxido de metal alcalino y un compuesto de la fórmula general anterior se hacen reaccionar en presencia de oxígeno, la formación del reactivo de descomposición es fácilmente observable, ya que la mezcla de reacción, que es inicialmente transparente, adquiere un color ámbar oscuro [22].

La reacción para producir el reactivo de descomposición transcurre a temperatura ambiente simplemente mezclando los reactivos en un recipiente de reacción abierto, preferiblemente con agitación. No es necesario burbujear oxígeno en la mezcla de reacción, ya que el oxígeno atmosférico satisface los requisitos de la reacción. Por lo tanto, no se requiere control de temperatura o equipo especializado para llevar a cabo la reacción. Si se desea, la mezcla de reacción se puede calentar para acelerar la velocidad de reacción [22].

#### **5.4.1.2 Productos**

El reactivo de descomposición puede contener una cantidad sustancial de agua, lo que facilita la eliminación de compuestos orgánicos halogenados de un líquido inmiscible en agua (aceite dieléctrico) que los contiene porque las sustancias que quedan después de la descomposición forman dos fases fácilmente separables, a saber, una fase no acuosa que comprende el líquido inmiscible en agua y una fase acuosa que contiene los productos de la reacción de descomposición.

En adición, no se genera gas de hidrógeno durante las reacciones utilizadas en la realización de la reacción. En consecuencia, la mezcla de oxígeno e hidrógeno no se produce durante la operación del método, eliminando así un posible peligro.

La descomposición de compuestos orgánicos halogenados usando el método de la presente invención produce productos relativamente inocuos, siendo los principales el cloruro de sodio y diversos compuestos orgánicos deshalogenados.

La descomposición de otros compuestos orgánicos halogenados da como resultado la descomposición de PCB, de acuerdo con la presente invención produce derivados fenólicos producción de diferentes derivados oxigenados que pueden convertirse en compuestos polihidroxilados útiles como reactivos en la producción de polímeros, como plastificantes, como antioxidantes y como disolventes para reacciones a altas temperaturas. Los productos son fácilmente recuperables del medio de reacción mediante la técnica de separación descrita anteriormente. Considerando que los compuestos útiles producidos a partir de los productos recuperados pueden comercializarse [22]

#### **5.4.2 Proceso de reacondicionamiento**

Luego de que el aceite dieléctrico es descontaminado mediante la dechlorinación, debe seguir a una etapa de regeneración o reacondicionamiento, donde se eliminan las sustancias que se generaron durante su utilización y no fueron eliminadas en la centrifugación del proceso anterior. El proceso en general consta de un procesamiento térmico y una etapa de reincorporación de aditivos, donde se pasa el aceite en proceso continuo hasta que alcance las propiedades objetivo del producto final mostradas en la norma ASTM 3487.

El método de reacondicionamiento establecido es la deshidratación por termo vacío. Con este método se pueden lograr una buena regeneración del aceite dieléctrico.

En la tabla N° 43: se muestran las propiedades del aceite como producto final que se muestran como requisito mínimo de calidad [21].

Tabla N° 43: Propiedades físico-químicas y eléctricas solicitadas para el aceite regenerado

<b>Propiedad</b>	<b>Norma ASTM de referencia</b>	<b>Parámetro de cumplimiento</b>
Apariencia	D 1524	Claro y brillante
Viscosidad a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	D 445	12 máximo
Viscosidad a 100 °C (mm <sup>2</sup> /s)	D 445	3 máximo
Número de neutralización (mg KOH/g)	D 974	0,03 máximo
Estabilidad a la oxidación (lodos 72 horas % masa)	D 2440	0,1 máximo
Número de neutralización (72 horas, mg KOH/g)	D 2440	0,3 máximo
Estabilidad a la oxidación (lodos 164 horas % masa)	D 2440	0,2 mínimo
Número de neutralización (164 horas, mg KOH/g)	D 2440	0,4 máximo
Punto de inflamación (°C)	D 92/93	145 mínimo
Punto de fluidez (°C)	D 97	40 máximo
Punto de Anilina (°C)	D 611	63-84
Color	D 1500	0,5 máximo
Azufre corrosivo	D 1275	Ausente
Contenido de humedad (ppm)	D 1533	35 máximo
Contenido de PCB's (%)	D 4059	No detectable

Tensión interfacial (mN/m)	D 971	40 mínimo
Tensión de ruptura dieléctrica a 60 Hz (kV)	D 877	30 mínimo
Tensión de ruptura dieléctrica de impulso (kV a 25 °C)	D 3300	145 mínimo
Factor de Potencia a 25 °C	D 924	0,05 máximo
Factor de Potencia a 100 °C		0,3 máximo

Fuente: Sistema de implementación de declorinación

#### **5.4.2.1 Procesamiento térmico**

El proceso térmico seleccionado consta de 3 pasos deshidratación, la desgasificación y el filtrado del aceite dieléctrico.

Después de la separación de aceite dieléctrico libre de PCB se bombeará el aceite hacia un filtro de 10 micrómetros para evitar algunos residuos de la separación de sólidos que afecta la evaporación del agua y el calentamiento del aceite, este ingresa a un calentador para eliminar el agua y ocurrirá la deshidratación del aceite, la desgasificación se da al finalizar el proceso, en donde se eliminarán los gases, ya que en el proceso de recuperación no llega a eliminar los gases contenidos en el aceite.

#### **5.4.3 Proceso de recuperación**

El método escogido para la recuperación es por percolación con Tierras Fuller, tipo torre, para poder lograr un mayor desprendimiento de los contaminantes del aceite dieléctrico.

Es un sistema de tratamiento con Tierras Fuller, de manera que se eliminen los sólidos gruesos y se recuperen el resto de propiedades como apariencia, color y tensión superficial. El sistema se basa en torres de adsorción en paralelo de manera que se les pueda dar mantenimiento sin detener por completo el proceso de regeneración, además de que se obtiene una gran zona de transferencia de masa en un volumen reducido.

En este proceso el aceite que sale del calentador ingresa por la parte de arriba a las torres de adsorción acondicionadas en paralelo, el aceite cae por gravedad, luego será bombeado a un filtro de 10 micrómetros para eliminar partículas de las arcillas absorbentes e ingresará al tanque de deshidratación. El cual estará conectado a bombas de vacío para mejorar la eficiencia, obteniendo un aceite dieléctrico regenerado libre de PCB.

#### **5.4.4 Proceso de reincorporación de aditivos**

Luego de los procesos anteriores donde se eliminan los agentes generados por envejecimiento del aceite durante su vida útil, se procede a una etapa donde se le agregan nuevamente los aditivos necesarios para su reutilización como material dieléctrico. Los aditivos que se agregan al aceite dependen directamente del fabricante, por lo que no existe una lista general de cuáles deben agregarse como mínimo. Siempre y que se cumpla con las características descritas en la norma ASTM 3487, el fabricante puede utilizar la cantidad y variedad de aditivos que considere necesarios para sus estándares de calidad.

En general los compuestos más comúnmente utilizados y que deben reincorporarse al aceite debido a su posible agotamiento durante su tiempo de vida útil son los antioxidantes y anticorrosivos, por lo que siempre deben agregarse para mantener las propiedades importantes del aceite dentro del rango permitido durante el tiempo estimado de trabajo. Además de estos se analizarán los que se consideren necesarios para un buen funcionamiento del aceite dieléctrico, pero que la empresa debe contemplar mediante un análisis de costo-beneficio [21].

##### **5.4.4.1 Antioxidantes**

Hidroxi-tolueno butilado (BHT): Rudnick (2009) define al BHT como el agente antioxidante más comúnmente utilizado en aplicaciones industriales y su función radica en interactuar con los radicales libres e hidroperóxidos, de manera que se interrumpa la reacción en cadena que se mencionó en el apartado de ésteres de ácidos grasos y con esto evitar la oxidación del aceite hasta su agotamiento.

EL BHT se clasifica como un fenol impedido y se caracteriza junto al 2,6-di-*tert*-butilfenol como los antioxidantes más volátiles por lo que se reservan para aplicaciones donde la volatilidad no sea de importancia y el fluido se va a utilizar durante mucho tiempo. Otros ejemplos de antioxidantes utilizados para aceites y lubricantes son las diaril-aminas con diferentes grados alquilación, sulfurados fenólicos de doble función y otro fenol impedido como el 4,4'-Metilenbis (2,6-di-*tert*-butilfenol) que es de los más efectivos por sus propiedades de regeneración de antioxidantes naturales del aceite y su resistencia al cambio de temperatura (Bruce, 2012). Se definió el BHT como el antioxidante del aceite a tratar debido a que se encontró una proporción importante de este en la muestra de aceite nuevo de La Compañía en el análisis GC-MS [21].

##### **5.4.4.2 Anticorrosivos**

El aceite utilizado por la compañía proviene de un sistema de hidrotratamiento que elimina el azufre y nitrógeno presente, sin embargo, como se menciona en el trabajo de Lewand (2002) el azufre puede encontrarse presente en los materiales del núcleo del transformador como el cobre, papel de aislamiento y algunas empaquetaduras. No todo el azufre se

considera corrosivo pero debido a las altas temperaturas en que trabaja el transformador, existe la posibilidad de activar su reactividad. Esto implica que se provoquen daños en el sistema, en especial en sistema sellados (baja presencia de oxígeno) debido a que genera una preferencia a la reacción con cobre y otros metales.

Según Bruce (2012) se muestra que existen dos tipos de corrosión en este tipo de sistemas, la del mecanismo del hierro y las de metal amarillo. La primera es la más conocida y se basa en la formación de una corriente de electrones de un ánodo a un cátodo, lo que concluye en la generación de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hidratado (herrumbre). El aditivo que contrarresta este proceso se formula a partir de varios compuestos como alquifenoles polimetoxilados, sulfonatos, aditivos que contengan fosfatos y del grupo funcional succinimida, aminas poliméricas, entre otros. El inhibidor adecuado formará una capa de protección sobre el metal que lo protege del oxígeno y el agua, por lo que no generará un producto residual indeseado en solución con el aceite. Para el aceite proveniente del tratamiento de los residuos sólidos generados por el descartado de transformadores, es necesario analizar la peligrosidad de estas sustancias.

Para la corrosión de metal amarillo, se necesita un inhibidor distinto ya que el cobre necesita de una capa preliminar de óxido de cobre para que el aditivo pueda adherirse y formar una capa compuesta muy cohesiva que no permite la interacción de ácidos o agua con el metal. Generalmente los derivados de mercaptotiadiazoles doblemente sustituidos con disulfuros protegen el cobre al reaccionar con el azufre activo y formando trisulfuros. La reacción anterior sucede en la capa cohesiva antes mencionada, formando una capa “pasivadora” que contiene un anillo de tiadiazol en la superficie del cobre. Es por lo anterior que estos aditivos deben analizarse para determinar si requieren de un tratamiento especial durante el proceso de descontaminación de residuos sólidos provenientes de los transformadores descartados. [21].

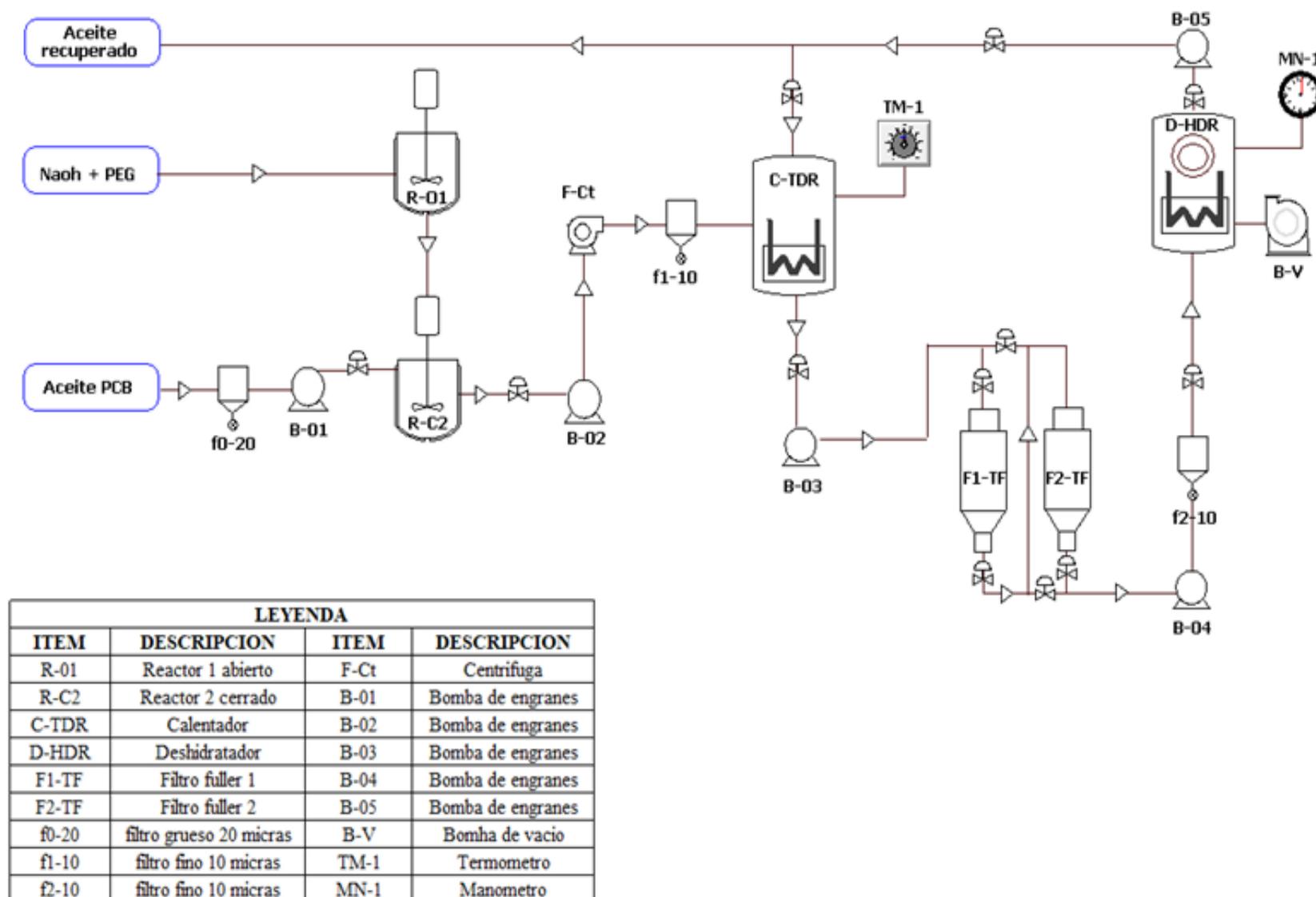


Figura 37: Proceso de la maquina  
Fuente: Elaboración propia

## **5.5 ETAPA 4: Requerimientos del diseño**

Para poder establecer las condiciones de trabajo en que la que operará la máquina, se analizó cada una de las fases. Este tipo de análisis ayudan a determinar los tipos de materiales y sistemas de control que serán apropiados para soportar la carga del proceso y que permita que la maquina sea controlada.

### **5.5.1 Análisis de los equipos principales**

La determinación de las características primordiales de los equipos y su relación con las operaciones unitarias es una de las fases más importantes para un análisis de proceso. Se debe identificar la función primordial del equipo, sus entradas y salidas tanto de servicio como de materiales, las condiciones normales de operación y cualquier sistema de control que el equipo tenga adecuado [21].

#### **5.5.1.1 Reactores de declorinación**

Los dos tanques son el sistema principal del proceso, ya que es donde se realiza la reacción de declorinación. Los tanques son además los equipos más complejos, pues constan de un recipiente cilíndrico agitado, entradas y salidas a razón de las sustancias que se necesitan para la reacción.

En el primer reactor (R-O1) se producirá la formación del reactivo KOH+PEG será abierto, ya que la presencia de oxígeno favorece la reacción y contará con una salida por donde la reacción será bombeada hacia el segundo reactor (R-C2), este contará con dos entradas, una entrada del reactivo formado KPEG, otra entrada del aceite dieléctrico (PCB) proveniente del transformador. La otra salida del reactor R-02 es la del producto final, conformado por el aceite totalmente declorinado y los demás productos secundarios, que se dirigirán hacia la centrífuga de separación. y finalmente un sistema de recirculación de aceite que permita el recalentamiento de este, para así mantener la temperatura de reacción en un ámbito adecuado.

Como sistema complementario, los reactores cuentan con un calentador de aceite, de manera que la temperatura se mantenga constante durante el tiempo de reacción. Es imperativo que la reacción se mantenga en 88°C, primeramente, para que se acelere la reacción y se sobrepase la energía de activación necesaria para separar el ion cloruro, y luego no puede elevarse mucho debido a la formación de gases inflamables a la temperatura de inflamación del aceite mineral (aproximadamente 146°C).

### **5.5.1.2 Centrífuga**

Este equipo se encarga de separar el aceite declorinado de los demás productos de reacción, a razón de las diferencias de densidad entre estos mientras que los otros residuos (generalmente en estado sólido) se separan del aceite solamente por el efecto de la fuerza centrífuga.

Como se menciona anteriormente el equipo cuenta con una entrada de la mezcla de productos provenientes de los reactores. Por el otro extremo del equipo sale todas las sustancias solubles en esta, y por la otra salida el aceite limpio y preparado para entrar al sistema de regeneración. Dentro del equipo se encuentra un tanque receptor de lodos y sólidos, colocado bajo la zona de proceso de manera que las sustancias pesadas se acumulen y separen de la fase acuosa [21].

### **5.5.1.3 Calentador y deshidratador**

Mediante el tratamiento de termo vacío el aceite se calienta entre 70 y 80 °C (punto de anilina), con la finalidad que los compuestos polares se solubilicen en el aceite y permitan una fácil eliminación en la fase de percolación de tierra fuller

El calentamiento también ayuda a disminuir la viscosidad del aceite y con esto potenciar su fluidez y capacidad para eliminar los gases atrapados dentro de este, permitiendo a su vez presiones de trabajo relativamente bajas.

El secado se realiza en una cámara de vacío recubierta de fibra de vidrio de manera que se promueva la eficiencia de la transferencia de calor, y a su vez no permite que aire húmedo del exterior provoque una hidratación del aceite antes de que sea bombeado a los tanques de declorinación. El sistema cuenta con una entrada de aceite con humedad, una salida de aceite deshidratado hacia los tanques de tierra fuller, también tendrá una salida de vapor de agua y otros gases que se conecta a válvulas de mariposa y una bomba de vacío, de manera que se permita la salida de este sin riesgo de entrada del aire del entorno. Sometiendo a alto vacío de presión menor a 1 bar también potencia la remoción de los gases adsorbidos en el aceite, que luego son eliminados a través del escape de la bomba de vacío.

La importancia de la eliminación del agua y producción de un vacío en el aceite es que la humedad y el aire aceleran las reacciones de oxidación y afectan algunas propiedades como la tensión de ruptura dieléctrica, factor de potencia, número de neutralización y por supuesto el contenido de humedad.

### **5.5.1.4 Torres de Absorción de Tierra Fuller**

Como se mencionó anteriormente, la regeneración se lleva a cabo mediante columnas de absorción cilíndricas totalmente selladas, las cuales cuentan con una entrada para aceite.

Por debajo tienen una salida que conecta a una tubería común donde el aceite de todas las torres se une y puede pasar a la siguiente etapa [21].

#### 5.5.1.5 Adivinación del antioxidante bajo termo vacío.

Se adiciona bajo tratamiento de termo vacío el inhibidor de oxidación en un porcentaje de 0,3% en peso de aceite, ya que esta sustancia termoestable interrumpe las reacciones de oxidación del aceite y prolonga así la vida útil del aceite y por ende de la unidad. La aditivación se realiza según norma ASTM D3487.

Tabla N°44: Requerimientos de los componentes de la máquina para la selección de materiales.

<b>Componentes</b>	<b>Requerimientos de diseño</b>
<b>Reactor 1 (RO1) / Reactor 2 (RC2)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Los reactores deben ser de un material que resista la corrosión y la hidroscofia.</li> <li>-Ambos reactores contarán con resistencias y un agitador.</li> <li>-Ro1: Reactor abierto con agitador y resistencias</li> <li>-Rc2: Reactor cerrado con agitador y resistencia.</li> <li style="padding-left: 40px;">Filtro para las emisiones de gases producidos en la reacción</li> </ul>
<b>Centrifugación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-El material de la centrifuga debe soportar la corrosión y la hidroscofia</li> <li>-Debe contener un depósito para los residuos.</li> </ul>
<b>Calentador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Soportar la corrosión</li> <li>-Debe contar con un filtro para los gases.</li> <li>-El aceite de debe calentar a una T° entre 70-80 °C.</li> <li>-Resistencias</li> </ul>
<b>Filtros de tierra Fuller</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las columnas tienen que tener una válvula para liberar presión</li> <li>-Tiene que tener medidores de presión en la entrada del aceite</li> </ul>
<b>Tanque de deshidratación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-El material a usar debe soportar las presiones de vacío.</li> <li>-Soportar la corrosión</li> <li>-Debe contar con un filtro para los gases.</li> <li>-El aceite de debe calentar a una T° entre 70 °C</li> <li>-Debe tener un controlador de Temperatura.</li> <li>-Presión : &lt; 1 bar</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 45: Matriz morfológica para la selección del tipo de los materiales

<b>CRITERIOS DE PONDERACION</b>		
<b>Criterio</b>	<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Manufacturabilidad	M	1,5
Resistencia	R	2
Seguridad	S	2
Costos bajos	C	1,5
Piezas Estándar	P	1,5
Factor de higiene y mantenimiento	F.H	1,5
<b>TOTAL</b>		<b>10</b>

Fuente: Elaboración propia

**Criterios de ponderación:**

- **Manufacturabilidad:** Este criterio indica que el material que se escoja sea maquinado con facilidad.
- **Resistencia:** Es uno de los criterios más importantes, el material debe soportar los parámetros y requerimientos del diseño establecido.
- **Seguridad:** El material escogido debe brindar la seguridad que el trabajo se desempeñe sin ningún problema.
- **Costos bajos:** Es el valor más bajo.
- **Piezas estándar:** En este criterio también es importante que el material a elegir sea accesible, este dentro del mercado del país.
- **Factor de higiene y mantenimiento:** Este factor hace referencia a que el material permita la facilidad de higiene en el proceso y de mantenimiento sencillo.

Tabla N° 46: Selección del tipo de acero inoxidable

<b>TIPOS DE ACERO INOXIDABLE</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>	<b>APLICACIONES</b>
<b>Aceros Inoxidables Austeníticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La resistencia a la corrosión es muy alta.</li> <li>-La soldabilidad es muy buena.</li> <li>-Tiene un muy buen factor de higiene y limpieza.</li> <li>-La transformación es fácil.</li> <li>-Cumple una buena función a temperaturas muy elevadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Son vulnerables al agrietamiento por corrosión bajo tensiones (SCC) en ambientes de cloruro.</li> <li>-Endurecido solamente por trabajo en frío.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se emplean para temperaturas muy bajas como <math>-270^{\circ}\text{C}</math>.</li> <li>-Industria química.</li> <li>-Industria alimentaria.</li> <li>- Se usan en la arquitectura.</li> </ul>
<b>ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Presenta una modera resistencia a la corrosión.</li> <li>-Presenta una mayor soldabilidad que los grados martensíticos, pero menor que los grados austeníticos.</li> <li>-Presentan una menor ductilidad que los aceros austeníticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Su soldabilidad es pobre.</li> <li>-Se usan para procesos de formado en frío.</li> <li>-Son difíciles de trabajar.</li> <li>-No tienen apariencia uniforme.</li> <li>-Mayormente usan las industrias automotrices</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Industria automotriz.</li> <li>-Adornos decorativos y tanques de ácido nítrico.</li> <li>-Partes de hornos, boquillas y cámaras de combustión.</li> <li>-Tanques de agua caliente.</li> </ul>
<b>ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-A través del tratamiento térmico son endurecidos.</li> <li>-Excelente resistencia mecánica y dureza</li> <li>-Son magnéticos.</li> <li>-Excelente resistencia mecánica.</li> <li>-Bastante magnéticos,</li> <li>-Bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Moderada resistencia a la corrosión.</li> <li>-Pobre soldabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cubiertos, cuchillos de deporte y en herramientas multipropósito.</li> <li>-Aspas de turbinas (Tipo 403).</li> <li>-Revestimiento de asientos para válvulas.</li> <li>-Carcazas de bombas.</li> <li>-Cuerpos de válvulas y compresores.</li> <li>-Cuchillería, Hojas de afeitar e instrumentos quirúrgicos (Tipos 420 y 431).</li> <li>-Ejes, husos y pernos.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N<sup>a</sup> 47: Selección del material de la Serie 300 para los reactores

<b>Serie 300 AISI REACTORES</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>	<b>APLICACIONES</b>
301 AISI	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son de fácil formado.</li> <li>-Tiene una buena soldabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Presentan una resistencia menor en aceros de la serie 300</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Partes de aviones.</li> <li>- Adornos arquitectónicos. - cajas de ferrocarril y de tráiler, cubiertas de rines.</li> <li>- Industria alimentaria.</li> </ul>
303 AISI	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Son especial para maquinados.</li> <li>-Buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se emplean a temperatura altas.</li> <li>- Se utilizan para cortes pesados.</li> <li>-Menor resistencia a la corrosión que el tipo 304</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se usa para fabricar de partes para bombas, bushings, partes maquinadas y flechas.</li> </ul>
304 AISI	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se usa para construcciones ligeras soldadas.</li> <li>-Tienen buena resistencia a la corrosión.</li> <li>-Buenas propiedades mecánicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No presenta mucha resistencia a elevadas T°.</li> <li>-No presenta mucha resistencia a la corrosión como los del tipo 316</li> <li>-Es recomendable cuando se requiera soldar altos espesores de materia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Industria química.</li> <li>-Accesorios para aviones.</li> <li>-Equipo para hospitales.</li> </ul>
309 AISI	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Presenta una buena resistencia frente a la corrosión.</li> <li>-Alta tenacidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Resistencia a la oxidación en T° de hasta 1000°C.</li> <li>- Endurecidos por tratamiento en caliente (rugoso)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Calentadores.</li> <li>-Quemadores.</li> <li>-Industria química.</li> <li>-Intercambiadores de calor</li> </ul>

<b>310 AISI</b>	-Resistente a la oxidación en altas temperaturas	-Usado en servicios de alta temperatura	-Se utiliza para fabricar calentadores de aire, equipo para tratamiento térmico de aceros, equipo químico de procesos, etc
<b>316 AISI</b>	-Presenta una excelente resistencia a la corrosión frente químicos agresivos, ácidos y atmosfera salina.  -El molibdeno hace que mejore la resistencia a la corrosión, frente a los cloruros. -Presenta propiedades mecánicas parecidas a las del tipo 304	-Los ácidos halogenados atacan todas las formas de acero inoxidable rápidamente, incluso a bajas T°  -Las sales halogenadas pueden causar graves picaduras en todos os aceros inoxidables	-Industria de la arquitectura., -Industria alimentaria. -Industria farmacéutica. - Industria fotográfica y textil.

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 48: Selección de material para el calentador

<b>Serie 300 AISI CALENTADOR</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>	<b>APLICACIONES</b>
301 AISI	- Son de fácil formado. -Tiene una buena soldabilidad	-Presentan una resistencia menor en aceros de la serie 300	-Partes de aviones. -Adornos arquitectónicos. - cajas de ferrocarril y de tráiler, cubiertas de rines. - Industria alimentaria.
<b>303 AISI</b>	-Son especial para maquinados.  -Buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas	-Se emplean a temperatura altas. - Se utilizan para cortes pesados. -Menor resistencia a la corrosión que el tipo 304	-Se usa para fabricar partes para bombas, bushings, partes maquinadas y flechas.

<b>304 AISI</b>	<p>-Se usa para construcciones ligeras soldadas.</p> <p>-Tienen buena resistencia a la corrosión.</p> <p>-Buenas propiedades mecánicas.</p>	<p>- No presenta mucha resistencia a elevadas T°.</p> <p>-No presenta mucha resistencia a la corrosión como los del tipo 316</p> <p>-Es recomendable cuando se requiera soldar altos espesores de materia</p>	<p>-Industria química.</p> <p>-Accesorios para aviones.</p> <p>-Equipo para hospitales.</p>
<b>309 AISI</b>	<p>-Presenta una buena resistencia frente a la corrosión.</p> <p>-Alta tenacidad.</p>	<p>-Resistencia a la oxidación en T° de hasta 1000°C.</p> <p>- Endurecidos por tratamiento en caliente (rugoso)</p>	<p>-Calentadores.</p> <p>-Quemadores.</p> <p>-Industria química.</p> <p>-Intercambiadores de calor</p>
<b>310 AISI</b>	<p>-Resistente a la oxidación en altas temperaturas</p>	<p>-Usado en servicios de alta temperatura</p>	<p>-Se utiliza para - fabricar calentadores de aire, equipo para tratamiento térmico de aceros, equipo químico de procesos, etc</p>
<b>316 AISI</b>	<p>-Presenta una excelente resistencia a la corrosión frente químicos agresivos, acidos y atmosfera salina.</p> <p>-El molibdeno hace que mejore la resistencia a la corrosión, frente a los cloruros.</p> <p>-Presenta propiedades mecánicas parecidas a las del tipo 304</p>	<p>-Los ácidos halogenados atacan todas las formas de acero inoxidable rápidamente, incluso a bajas T°</p> <p>-Las sales halogenadas pueden causar graves picaduras en todos os aceros inoxidables</p>	<p>-Industria de la arquitectura.,</p> <p>-Industria alimentaria.</p> <p>-Industria farmacéutica.</p> <p>- Industria fotográfica y textil.</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 49: Selección de material para el filtro

<b>Tipo de arcilla</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>Arcilla atapulguita</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Única es su estructura cristalina.</li> <li>- Buena capacidad de absorción.</li> <li>- Puede absorber grandes cantidades de ácido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo de regeneración alto.</li> </ul>
<b>Bauxita Porocel</b> (alúmina activada)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede ser reutilizada de 20 a 25 veces sin problemas.</li> <li>- Pierde su eficiencia más lentamente.</li> <li>- Puede recuperar 2 veces más aceite antes de saturarse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un costo inicial alto</li> <li>- Su regeneración es un proceso difícil.</li> </ul>
<b>Las zeolitas</b> (silicatos de aluminio)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Soporta la deshidratación sin ningún camino esencial en su estructura cristalina.</li> <li>- Utilizada para regenerar el aceite de transformador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Su costo es muy elevado</li> <li>- Se utiliza en laboratorios y no a grandes escalas.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 50: Selección de material para el deshidratador

<b>Serie 300 AISI REACTORES</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>	<b>APLICACIONES</b>
<b>301 AISI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son de fácil formado.</li> <li>- Tiene una buena soldabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presentan una resistencia menor en aceros de la serie 300</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Partes de avione.</li> <li>- Adornos arquitectónicos.</li> <li>- cajas de ferrocarril y de tráiler, cubiertas de rines.</li> <li>- Industria alimentaria.</li> </ul>
<b>303 AISI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son especial para maquinados.</li> <li>- Buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se emplean a temperatura altas.</li> <li>- Se utilizan para cortes pesados.</li> <li>- Menor resistencia a la corrosión que el tipo 304</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se usa para fabricar partes para bombas, bushings, partes maquinadas y flechas.</li> </ul>

<b>304 AISI</b>	<p>-Se usa para construcciones ligeras soldadas.</p> <p>-Tienen buena resistencia a la corrosión.</p> <p>-Buenas propiedades mecánicas.</p>	<p>- No presenta mucha resistencia a elevadas T°.</p> <p>-No presenta mucha resistencia a la corrosión como los del tipo 316</p> <p>-Es recomendable cuando se requiera soldar altos espesores de materia</p>	<p>-Industria química.</p> <p>-Accesorios para aviones.</p> <p>-Equipo para hospitales.</p>
<b>309 AISI</b>	<p>-Presenta una buena resistencia frente a la corrosión.</p> <p>-Alta tenacidad.</p>	<p>-Resistencia a la oxidación en T° de hasta 1000°C.</p> <p>- Endurecidos por tratamiento en caliente (rugoso)</p>	<p>-Calentadores.</p> <p>-Quemadores.</p> <p>-Industria química.</p> <p>-Intercambiadores de calor</p>
<b>310 AISI</b>	<p>-Resistente a la oxidación en altas temperaturas</p>	<p>-Usado en servicios de alta temperatura</p>	<p>-Se utiliza para fabricar calentadores de aire, equipo para tratamiento térmico de aceros, equipo químico de procesos, etc</p>
<b>316 AISI</b>	<p>-Presenta una excelente resistencia a la corrosión frente químicos agresivos, ácidos y atmosfera salina.</p> <p>-El molibdeno hace que mejore la resistencia a la corrosión, frente a los cloruros.</p> <p>-Presenta propiedades mecánicas parecidas a las del tipo 304</p>	<p>-Los ácidos halogenados atacan todas las formas de acero inoxidable rápidamente, incluso a bajas T°</p> <p>-Las sales halogenadas pueden causar graves picaduras en todos os aceros inoxidables</p>	<p>-Industria de la arquitectura.,</p> <p>-Industria alimentaria.</p> <p>-Industria farmacéutica.</p> <p>- Industria fotográfica y textil.</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 51: Selección de materiales para cada componente de la maquina

Aspecto	Alternativas	CRISTERIOS DE EVALUACIÓN						
		M (1,5)	R (2)	S (2)	C (1,5)	P (1,5)	F.M (1,5)	TOTAL
Tipo de acero inoxidable	Acero inoxidable Austeníticos	1,5	2	2	1	1	1,5	9
	Acero inoxidable Ferríticos	1	1,5	1,5	1	1	0,5	6,5
	Acero inoxidable Martensíticos	1,5	1,5	2	1	1	1,5	8,5
Aspecto	Alternativas	CRISTERIOS DE EVALUACIÓN						
		M (1,5)	R (2)	S (2)	C (1,5)	P (1,5)	F.M (1,5)	TOTAL
Selección del acero inoxidable de la serie 300 AISI	301 AISI	1,5	1	1	1	1	1	6,5
	303 AISI	1,5	1,5	1	1	1	1	7
	304 AISI	1,5	1,5	1,5	1	1,5	1,5	8,5
	309 AISI	1,5	1,5	1,5	1	1	0,5	7
	310 AISI	1,5	1,5	1,5	1	1	1,5	8
	316 AISI	1,5	2	2	0,5	1,5	1,5	9

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 52: Selección de materiales para cada componente de la maquina

CALENTADOR	Alternativas	CRISTERIOS DE EVALUACIÓN						
		M (1,5)	R (2)	S (2)	C (1,5)	P (1,5)	F.M (1,5)	TOTAL
Selección del acero inoxidable de la serie 300 AISI	301 AISI	1,5	1	1	1	1	1	6,5
	303 AISI	1,5	1,5	1	1	1	1	7
	304 AISI	1,5	2	2	1	1,5	1,5	9,5
	309 AISI	1,5	1,5	1,5	1	1	0,5	7
	310 AISI	1,5	1,5	1,5	1	1	1,5	8
	316 AISI	1,5	2	2	0,5	1,5	1,5	9
CALENTADOR	Alternativas	CRISTERIOS DE EVALUACIÓN						
		M (1,5)	R (2)	S (2)	C (1,5)	P (1,5)	F.M (1,5)	TOTAL
Selección del acero inoxidable de la serie 300 AISI	Arcilla Atapulguita	1,5	1,5	2	1	1	1	8
	Bauxita Porocel (alumina activada)	1,5	2	2	1	1,5	1	9
	Las -Zeolitas (silicatos de aluminio)	1	2	2	0,5	1,5	1,5	7,5
DESHIDRATADOR	Alternativas	CRISTERIOS DE EVALUACIÓN						
		M (1,5)	R (2)	S (2)	C (1,5)	P (1,5)	F.M (1,5)	TOTAL
Selección del acero inoxidable de la serie 300 AISI	301 AISI	1,5	1	1	1	1	1	6,5
	303 AISI	1,5	1,5	1	1	1	1	7
	304 AISI	1,5	2	2	1	1,5	1,5	9,5
	309 AISI	1,5	1,5	1,5	1	1	0,5	7
	310 AISI	1,5	1,5	1,5	1	1	1,5	8
	316 AISI	1,5	2	2	0,5	1,5	1,5	9

Fuente: Elaboración propia

## VI. DISEÑO INGENIERIL DE LA MAQUINA PARA TRATAMIENTO Y REUTILIZACION DE ACEITE DIELECTRICO PCB

Para el diseño ingenieril de la maquina es importante haber definido la cantidad promedio de aceite que se va a regenerar por transformador, evitando así el sobredimensionamiento.

La capacidad de producción de esta máquina ha sido establecida de acuerdo a las demandas actuales de los transformadores de distribución aéreos de media tensión de la ciudad de Chiclayo, se establece que la maquina será diseñada para tratar bajos volúmenes de aceite dieléctrico , garantizando la descontaminación del PCB, regeneración y recuperación del aceite dieléctrico.

De acuerdo a los objetivos del proyecto la maquina será diseñada para tratar volúmenes de 100 kg, si transformador contiene más de 100 kg de aceite, se realizará por tandas. La máquina tiene que tener como resultado un aceite dieléctrico que cumpla los parámetros de limpieza según ASTM (Sociedad Americana de pruebas y materiales).

Antes del servicio se debe extraer muestras del aceite aislante para el respectivo análisis Físicoquímico en campo para verificar las condiciones iniciales del fluido, que generalmente incluyen los siguientes parámetros, con sus respectivas metodologías normalizadas.

- **Pruebas más importantes para aceites dieléctricos:**
  - **Análisis de contenido de PCB:** Es tipo de prueba es obligatoria y permite conocer si el aceite dieléctrico presenta contaminación con Bifenilos policlorados.
  - **Análisis de tensión interfacial:** Esta prueba ayuda a detectar el inicio de oxidación en el aceite.
  - **Análisis de rigidez Dieléctrica:** Esta prueba mide la capacidad de aislamiento que tiene el aceite, cuando el aceite presenta una baja rigidez dieléctrica es un síntoma que contiene humedad o contaminantes solidos suspendidos.
  - **Análisis de acidez:** Esta prueba mide el contenido de componentes ácidos presentes en el aceite, demostrando el deterioro químico del mismo la necesidad de hacer una regeneración. Este análisis es muy importante ya que cuando el aceite presenta un alto grado de acidez permite la formación de sólidos, los cuales llegan a obstruir los conductos de refrigeración, atacando el cobre, el hierro y el papel aislante.
  - **Análisis de Color:** Indica el contenido de impurezas mecánicas que se encuentran en suspensión y de la vida útil esperada del aceite.

Tabla N<sup>a</sup> 53: Definición de características de cada componente de la maquina

Componentes	Parámetros principales	Sistemas de control y seguridad	Material
<b>Reactor 1 (reactivo)</b>	$T^{\circ}_{reactivos} = 25^{\circ}\text{C}$ $Vol_{reactivos} = 20 \text{ L}$ $V_{agitacion} = 155 \text{ rpm}$ $T(s) = 20 \text{ min}$	-Termocupla	Acero inoxidable Tipo 316 AISI
<b>Reactor 2 (declorinación)</b>	$T^{\circ}_{reaccion} = 88^{\circ}\text{C}$ $Vol_{aceite} = 100 \text{ L}$ $V_{agitacion} = 88 \text{ rpm}$	-Termocupla	Acero inoxidable Tipo 316 AISI
<b>Centrifugación</b>	$Densidad\ fluido = 949 \text{ kg/m}^3$ $Viscosidad = 0,17 \text{ kg/ms}$	-Depósito para los residuos	Acero inoxidable Tipo 316 AISI
<b>Calentador</b>	$T^{\circ}_{aceite} = 65^{\circ}\text{C}$ 70-80 (CPI-COP) $\%_{agua} = < 30 \text{ ppm}$	-Debe tener un controlador de Temperatura.	Acero inoxidable Tipo 304AISI
<b>Filtros de tierra Fuller</b>	$Vol_{arcilla} = 30 \text{ kg por filtro}$ $T_{ama\tilde{n}o\ de\ arcilla} = 3-5 \text{ mm}$ $Porosidad = 30 - \text{mesh}$ $T^{\circ}_{aceite} = 65^{\circ}\text{C}$ $Densidad\ fluido = 949 \text{ kg/m}^3$	-Las columnas tienen que tener una válvula para liberar presión -Tiene que tener medidores de presión en la entrada del aceite.	Arcilla: bauxita 30- 60 mesh -1gal = 2,5 libras de arcilla. -1,0 a 0,2 de koh/gm ¾ de bauxita por galon -h=15 pies D=5 pies
<b>Deshidratación</b>	$T^{\circ}_{aceite} = 70^{\circ}\text{C}$ $P_{vacio} = 0,7012 \text{ bar}$ < 1 bar (PNI COP)	-Salida para el vapor -Termocupla -Debe contar con un filtro para los gases.	Acero inoxidable Tipo 304AISI Espesor: 6 mm

Fuente: Elaboración propia

## 6.1 Dimensionamiento de los componentes de la máquina

### 6.1.1 Reactor (R-O1)

- **Datos de entrada**

El reactor (R-O1) debe lograr una rápida agitación y una mezcla de forma homogénea de los reactivos de NaOH y PEG. R-01 será diseñado para tener una capacidad de 0,035 m<sup>3</sup>, permitiendo tener dos tandas de reactivos, cada tanda de 20 litros /c.u.

El objetivo es que las mezclas de estos reactivos logren la declorinación de los PCB contenidos en aceites dieléctricos, el porcentaje máximo de PCB a tratar por cada 100 litros es de 0,8%.

Tabla N° 54: Densidad y viscosidad de los reactivos

	<b>Densidad</b>	<b>Viscosidad</b>
<b>NaOH</b>	2,13 g/ cm <sup>3</sup>	1 cp = 1mPas =0,001 kg/ms
<b>PEG</b>	1,13 g/ cm <sup>3</sup>	105 – 140 mPas = 0,14 kg/ms
<b>Agua</b>	0,997 g/cm <sup>3</sup>	0,1 pa.s

Fuente: Elaboración propia

En función a estos datos iniciales se desarrollará la propuesta del diseño del agitador.

Tabla N° 55: Datos de entrada para el reactor R-O1

<b>Fluido a agitar</b>	NaOH y PEG (poliglicol)
<b>Densidad fluido</b>	1215,7 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidad máxima</b>	105 – 140 mPas
<b>Presión de operación</b>	Presión atmosférica
<b>Temperatura de trabajo</b>	25 ° C
<b>Diámetro del reactor</b>	30 cm
<b>Altura del reactor</b>	50 cm
<b>Tapa del reactor</b>	Curva
<b>Fondo</b>	Plano
<b>Altura de relleno</b>	30 cm
<b>Volumen de llenado</b>	0,035 m <sup>3</sup>
<b>Ancho de aspa</b>	2,5 cm
<b>Altura de aspa</b>	2 cm
<b>Longitud del eje del agitador</b>	45 cm

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.1.1 Selección del tipo de impulsador para baja viscosidad

Para la selección del tipo de impulsor el análisis se va a limitar a lo más populares.

Generalmente están montados sobre un eje movido por un motor arreglado en forma axial

- **Tipo de impulsador Propetas o hélice**

- En este tipo de impulsor de hélice el flujo es axial, opera a altas velocidades y se emplea para líquidos con una viscosidad baja.
- Las hélices pequeñas pueden trabajar usando una transmisión de forma directa con velocidades que varía entre 1150 y 1750 rpm
- Las hélices grandes pueden trabajar en un rango de 400 y 800 rpm
- Las hélices cortan el líquido, debido a la persistencia de las corrientes de flujo.
- Muy eficaces en estanques de gran tamaño.
- Se utilizan para homogenizar, suspender fluidos y favorecer el intercambio de calor.

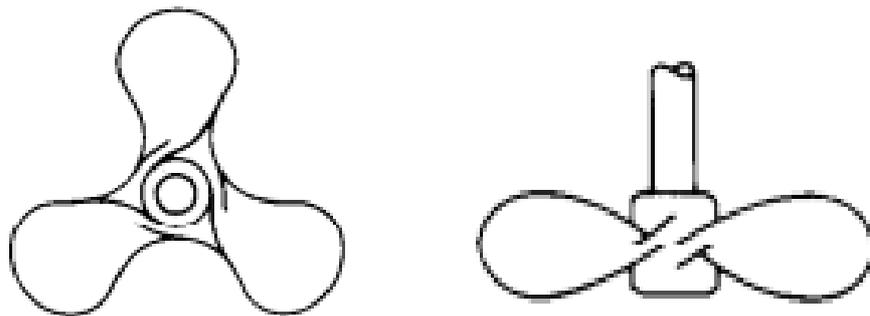


Figura 38: impulsador propeta o hélice  
Fuente: operaciones de transferencia de masa. Robert E. Treybal

Tabla N° 56: Características impulsor tipo hélice

<b>Descripción</b>	Generalmente utilizan 3 alabes o paletas
<b>Campo de flujo generado</b>	Axial
<b>Régimen alcanzado</b>	Turbulento
<b>Velocidad tangencial</b>	3 – 15 m/s
<b>Viscosidad del medio</b>	< 8 Pa·s

Fuente: Diseño y cálculo de un agitador de fluidos, V. Castillo Uribe

- **Turbina**
- Este impulsor está compuesto de numerosas palas cortas, las cuales operan a medias y altas velocidades.
- Se consideran velocidades medias en el rango de 100 a 300 rpm y velocidades elevadas entre 300 a 1000 rpm.
- El diámetro de la turbina puede variar entre un 30 y un 50 % del diámetro del tanque.
- Para líquidos una viscosidad baja, la turbina generan unas corrientes fuertes que se distribuyen por todo el tanque, eliminando bolsas de fluido estancado.
- Los componentes tangenciales provocan la formación de vórtices y remolinos, para evitar se usan placas deflectoras para una eficaz agitación.
- Se usa en amplia variedad de impulsores sin tomar en consideración el diseño, dirección de descarga o el carácter del flujo.
- La cantidad más común de hojas en un impulsador es cuatro o seis. Las cuales pueden ser planas o curvas.
- Son usadas para transferencia de masa.

- **Turbina de hojas planas.**

- El flujo que produce este tipo de impulsor de turbina es radial, desplazándose hacia las paredes del estanque.
- Su diseño es simple y se emplea para fluidos cuya viscosidad alcanza hasta los 0,11 Pa·s.
- El comportamiento del fluido que se desplaza es el más predecible de los agitadores.
- Esta turbina de hojas verticales produce patrones de flujo radial.
- El ancho de las hojas generalmente es de un quinto a un octavo del diámetro de la turbina

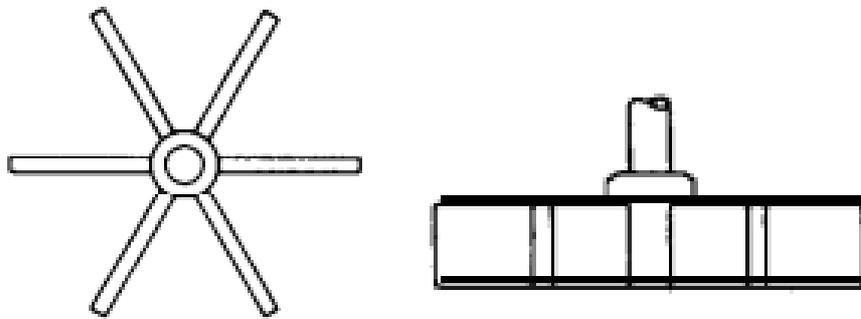


Figura 39: impulsor propeta o hélice  
Fuente: operaciones de transferencia de masa. Robert E. Treybal

- **Turbina de disco de hoja (Turbina Rushton)**

- Es el impulsador más corriente usado en el ámbito industrial y mezclado general.
- Diseño con seis hojas es el más común.
- El impulsor de disco de hoja produce flujos radiales y axiales. El disco produce un efecto estabilizante
- Se presenta también con hojas curvas y su diámetro cubre un rango de 30 y un 50 % del diámetro del tanque.

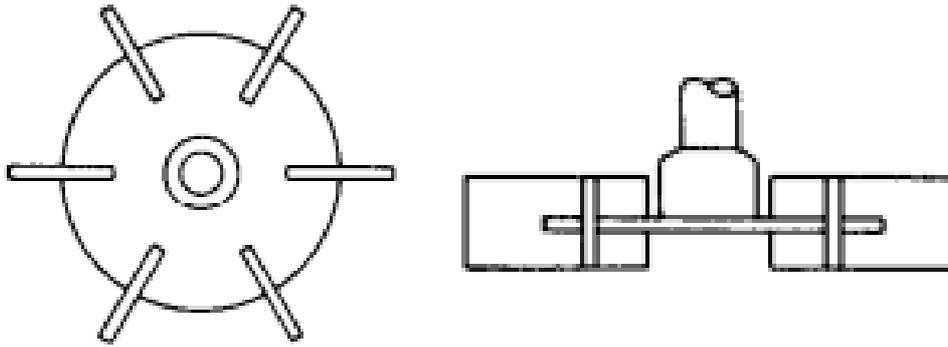


Figura 40: Impulsador turbina tipo hoja disco de hoja  
Fuente: operaciones de transferencia de masa. Robert E. Treybal

Tabla N° 57: Características impulsor tipo hélice

<b>Descripción</b>	Generalmente utilizan 3 alabes o paletas
<b>Campo de flujo generado</b>	Axial
<b>Régimen alcanzado</b>	Turbulento
<b>Velocidad tangencial</b>	3 – 15 m/s
<b>Viscosidad del medio</b>	< 8 Pa·s

Fuente: Diseño y cálculo de un agitador de fluidos, V. Castillo Uribe

- **Turbina tipo hojas inclinadas:**
- Este tipo de impulsor combina flujo radial con flujo axial, se utiliza especialmente para homogeneizar y mejorar la transferencia de calor con las paredes o serpentines dispuestos en el interior del estanque.

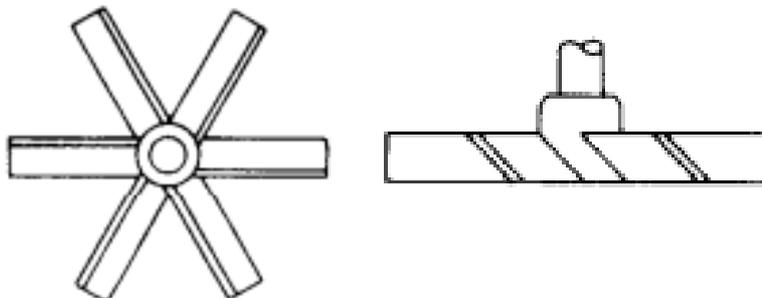


Figura 41: impulsador turbina tipo hoja inclinada  
Fuente: operaciones de transferencia de masa. Robert E. Treybal

### **6.1.1.2 Parámetros de diseño para el reactor (R-01)**

Para la selección del impulsador tendremos en cuenta que lo que se requiere en el primer reactor es una agitación para fluidos de baja viscosidad. Se seleccionó la de turbina Rushton del tipo turbina de disco de hojas planas 6 hojas planas ya que es el más común, debido a que este tipo de impulsor trabaja fluidos que tengan una baja viscosidad y para medias o altas velocidades. El diseño de este tipo de impulsor resulta más barato y fácil de construir que un impulsor de tipo hélice o de turbina con palas inclinadas

Considerando los requerimientos de diseño para los reactores, que deben soportar la corrosión se definió como material el acero inoxidable del tipo 316 para todos los componentes que estén dentro del reactor.

El eje estará ubicado en el centro del tanque, de forma que, se necesita usar placas deflectoras con el fin de eliminar los vórtices en el fluido.

El volumen del reactor R-01 es  $0,035m^3$ , como parámetros de entrada se especificó una altura en la parte cilíndrica del reactor de 50 cm y un radio de 15 cm

#### ***Definición del volumen del cilindro para el R-01***

$$V_{cilindro} = \pi * r^2 * h$$

#### **Donde:**

$$r = 15cm$$

$$h = 50 cm$$

$$V_{cilindro} = \pi * (15)^2 m * (50)m = 0,035 m^3$$

- **Semejanza geométrica**

Para comenzar con el diseño del reactor se pueden utilizar las semejanzas geométricas estandarizadas que relacionan las medidas generales del estanque con el impulsador tipo turbina des disco con hojas planas [24]

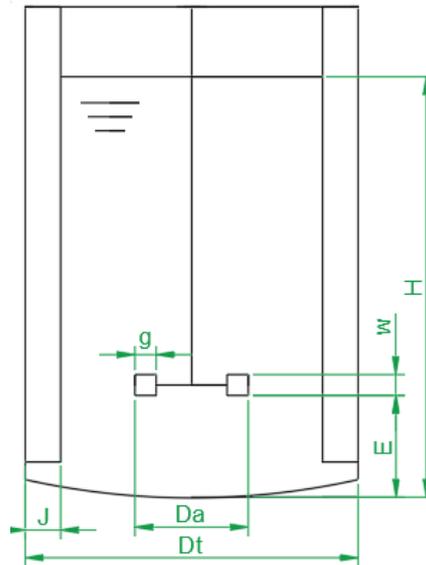


Figura 42: Semejanzas geométricas impulsador tipo turbina

Fuente: Elaboración propia con base de Transport phenomena , Brodkey y Hershey

Para el diseño de un agitador existe un gran número de variables a considerar para las semejanzas geométricas del reactor para el impulsador tipo turbina disco de hojas planas establecidas en [24]:

Tabla N° 58: Semejanza geométrica de un agitador de turbina de disco de hojas planas

<b>Variables para la semejanza geométrica de un agitador tipo turbina</b>	
- Dt: Diámetro del tanque	- $H/ Dt = 1$
- Da: Diámetro de palas	- $E/Dt = 0,33$
- H: Altura del fluido	- $W/Da = 0,2$
- Ancho	- $Da/Dt = 0,33$
- J: Cantidad de las placas deflectoras	- $G / Da = 0,25$
- E: Distancia desde el fondo del tanque hasta el impulsor	- $J/ Dt = 0,1$

Fuente: Transport phenomena , Brodkey y Hershey [24]

### 6.2.1.3 Dimensiones generales del R-O1

Para el reactor R-01 se eligió el impulsador de turbina de disco de hoja, y se considerando los parámetros iniciales del reactor, con ayuda de la tabla N° 58 se hayo las dimensiones generales del agitador.

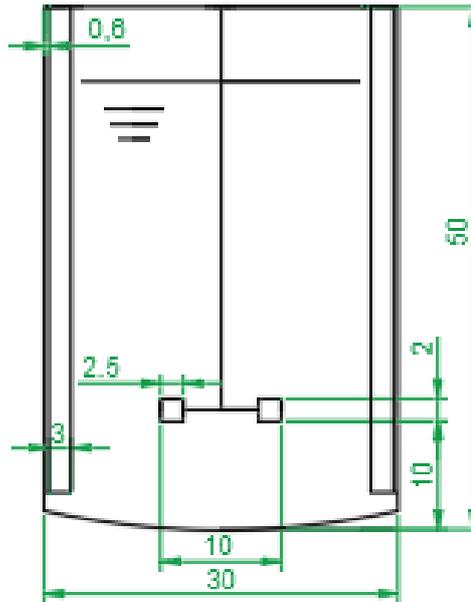


Figura 43: Dimensiones general del reactor R-01  
Fuente: Elaboración propia

- **Para el reactor R-01**

$$r = 15 \text{ cm}$$

$$h = 50 \text{ cm}$$

$$D = 30 \text{ cm}$$

- **Distancia fonda a base del impulsor  $E$**

$$E/Dt = 0,33$$

$$E = 0,33 * 30 = 9,9 \text{ cm} = 10 \text{ cm}$$

- **Diametro imsulsor ( $Da$ )**

$$Da/Dt = 0,33$$

$$Da = 0,33 * 30 = 9,9 \text{ cm} = 10 \text{ cm}$$

**Largo de paleta (g)**

$$g/Da = 0,25$$

$$g = 0,25 * 12 = 2,47 \text{ cm} = 2,5 \text{ cm}$$

- **Ancho de paleta (w)**

$$W/Da = 0,2$$

$$W = 0,2 * 12 = 1,98 \text{ cm} = 2 \text{ cm}$$

- **Dimensiones placas deflectoras: Ancho placa (J)**

$$J/Dt = 0,1$$

$$J = 0,1 * 36 = 3 \text{ cm}$$

- **Espacio entre placas y estanque (F)**

$$f/Dt = 0,02$$

$$f = 0,02 * 36 = 0,6 \text{ cm}$$

Con las dimensiones que fueron calculadas anteriormente se diseñó el reactor R-01 en el programa Solidworks, en anexos se detallan los planos.

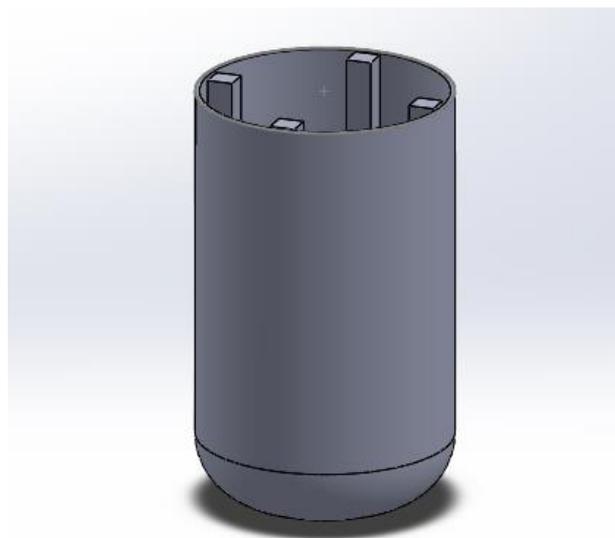


Figura 44: Diseño de R-01  
Fuente: Elaboración propia

Con las dimensiones que fueron calculadas anteriormente se diseñó el impulsor para el reactor R-01 con las dimensiones obtenidas anteriormente.

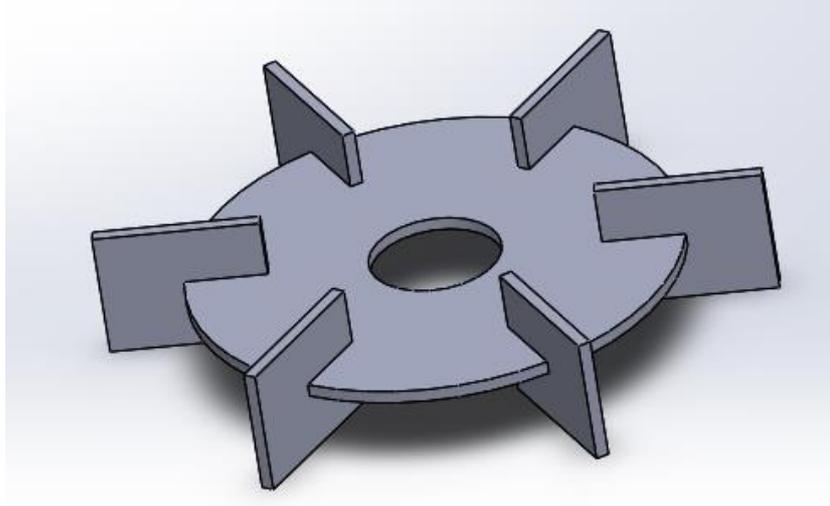


Figura 45: Impulsador para R-01 turbina Rushton  
Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.1.3 Calculo de potencia en el agitador R-01

Para poder calcular la potencia consumida del agitador, primero se calculó el número de Reynolds mediante la ecuación 2.

$$Re = \frac{N d^2 \rho}{\mu}$$

- Datos de entrada:

**Densidad hidróxido de sodio, PEG ( $\rho$ )= 1215,7 kg/m<sup>3</sup>**

**Viscosidad ( $\mu$ )= 0,14 kg/ms**

**Velocidad angular (N)= 153pm=2,55 rps**

**Diámetro del agitador (d)= 30 cm 0,30 m**

Para poder hallar la densidad de la mezcla se va a tener a la fracción volumétrica del sodio por la densidad del sodio sumado con la fracción volumétrica de PEG por la densidad del PEG, teniendo una densidad total de la mezcla.

$$\rho_M = (f_v * \rho_v) + (f_b * \rho_b)$$

$$\rho_M = \left( \frac{\frac{\%NaOH}{\rho_{NaOH}}}{\frac{\%NaOH}{\rho_{NaOH}} + \frac{\%PEG}{\rho_{PEG}}} \right) * (\rho_{NaOH}) + \left( \frac{\frac{\%PEG}{\rho_{NaOH}}}{\frac{\%NaOH}{\rho_{NaOH}} + \frac{\%PEG}{\rho_{PEG}}} \right) * (\rho_{PEG})$$

$$\rho_M = \left( \frac{\frac{0,1504}{2,13}}{\frac{0,1504}{2,13} + \frac{0,8496}{1,13}} \right) * (2,13) + \left( \frac{\frac{0,8496}{1,13}}{\frac{0,1504}{2,13} + \frac{0,8496}{1,13}} \right) * (1,13)$$

$$\rho_M = 1,2157 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_M = 1215,7 \text{ kg/m}^3$$

Como ya se halló la densidad de la mezcla se reemplazarán valores en la ecuación 8 y se halló el número de Reynolds.

$$\text{Re} = \frac{N d^2 * \rho}{\mu}$$

$$2000 = \frac{(N) 0,30^2 * 1215,7}{0,14}$$

$$N = 2,55 \text{ rps} = 153 \text{ rpm}$$

Utilizando la figura 44, se determinó el número de potencia (Np) interpolando con el número de Reynolds que fue calculado anteriormente, se usara la curva 1 del grafico que es para un impulsor de turbina de 6 palas con cuatro placas deflectoras.

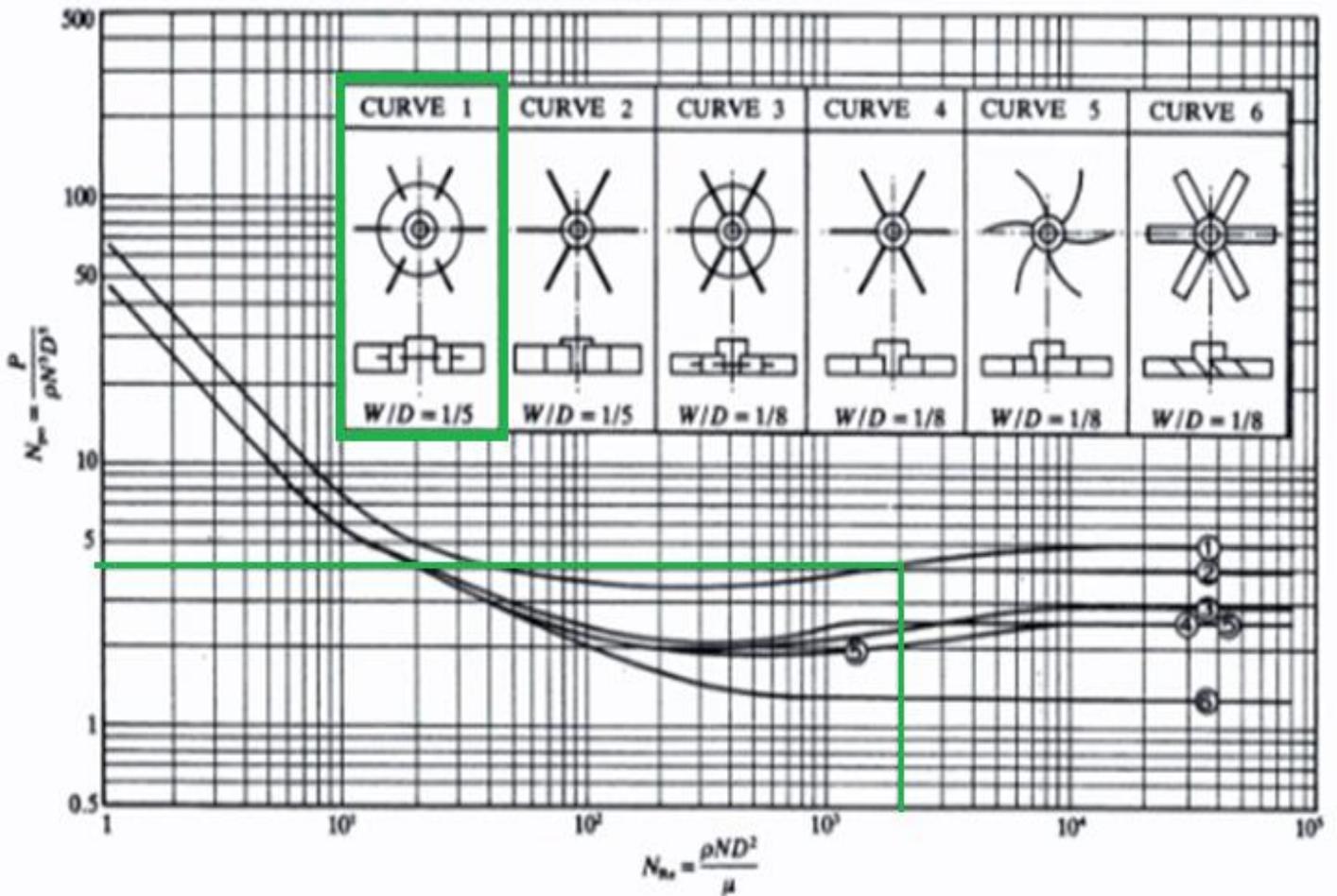


Figura 46: Número de potencia  $N_p$  frente a  $N_{Re}$  para turbina de 6 palas.  
Fuente: Transport phenomena , Brodkey y Hershey

Reemplazando los valores en la ecuación 3 se halló la potencia necesaria.

$$N_p = \frac{P}{N^3 * d^5 * \rho}$$

$$P = 4 (N^3 * d^5 * \rho) = 4 (2,55^3 * 0,3^5 * 1215,7)$$

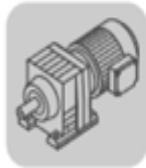
$$P = 195,9 \text{ watts} = 0,263 \text{ hp}$$

#### 6.1.1.4.- Selección del motoreductor

Para la selección del motoreductor, se consideraron la potencia y los RPM que fueron calculados anteriormente:

- Potencia: 0,196 KW
- Velocidad necesaria para la agitación: 153 rpm.

Se seleccionó el reductor de código R07 con una entrada de 1400 y una salida de 155 rpm.



R..DRE/DRS  
R.. → DRE/DRS

R07, $n_e = 1400$ 1/min					50 Nm
$n_a$ [1/min]	$M_{amax}$ [Nm]	$F_{Ra}$ [N]	$\psi_{(R)}$ [']	$i$	DT56 DR63 DRS71S
 3					
18	50	1510	-	78.24	
20	50	1510	-	71.47	
23	50	1510	-	60.32	
27	50	1510	-	51.52	
29	50	1470	-	47.78	
32	50	1420	-	44.16	
34	50	1380	-	41.31	
35	50	1370	-	40.34	
36	50	1340	-	38.51	
41	50	1270	-	34.05	
48	50	1190	-	29.08	
52	50	1150	-	26.97	
60	50	1080	-	23.32	
64	50	1040	-	21.73	
 2					
76	50	960	-	18.31	
84	50	920	-	16.73	
99	50	850	-	14.12	
116	50	790	-	12.06	
125	50	760	-	11.18	
145	50	710	-	9.67	
155	50	685	-	9.01	
178	49	645	-	7.85	
187	43	595	-	7.48	
205	43	535	-	6.83	

Figura 47: Selección del reductor para el Reactor 01  
Fuente: SEW

Se selección un motor DRS 71S 4 de 0,25 kW del catálogo de SEW

De 4 polos por que los rpm que necesitamos son bajos, y de categoría IE1

porque es de eficiencia estándar

## 2 Global Motor, 50/60 Hz, 4-Pole

4-pole DRS motors for 50/60 Hz, IE1\*

Motor type DRS	P <sub>N</sub> kW	M <sub>N</sub> Nm	n <sub>N</sub> rpm	I <sub>N</sub> A	cosφ	IE class	η <sub>50%</sub> %	η <sub>75%</sub> %	η <sub>100%</sub> %	I <sub>A</sub> /I <sub>N</sub>	M <sub>A</sub> /M <sub>N</sub>	M <sub>H</sub> /M <sub>N</sub>
DRS 71S 4	0.18	1.25 1.01	1380 1700	0.64 0.45	0.70 0.69	IE1*	- -	- -	- -	3.5 4.2	1.8 1.9	1.8 1.9
DRS 71S 4	0.25	1.72 1.4	1390 1700	0.67 0.62	0.75 0.69	IE1*	68.6 -	72.6 -	72.6 -	4.1 4.2	1.9 1.9	1.9 1.9
DRS 71S 4	0.37	2.55 2.1	1380 1700	1.14 1.06	0.70 0.65	IE1*	59.1 -	65.3 67.7	66.6 68.0	3.5 4.4	1.8 2.1	1.8 2.1
DRS 71M 4	0.55	3.8 3.1	1380 1700	1.55 1.31	0.72 0.68	IE1*	69.1 -	71.9 76.1	70.6 74.0	3.6 4.5	2.1 2.4	2.1 2.3

4-pole DRS motors for 50/60 Hz, IE1\*

Motor type DRS	P <sub>N</sub> kW	M <sub>N</sub> Nm	n <sub>N</sub> rpm	m kg	J <sub>Mot</sub> 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	BE..	Z <sub>0</sub> BG BGE 1/h	M <sub>B</sub> Nm	m <sub>B</sub> kg	J <sub>Mot_BE</sub> 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	Global	CEL	ENCE
DRS 71S 4	0.18	1.25 1.01	1380 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	2.5	10.2	6.2		-	-
DRS 71S 4	0.25	1.72 1.4	1390 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	3.5	10.2	6.2		-	-
DRS 71S 4	0.37	2.55 2.1	1380 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	5	10.2	6.2		-	-
DRS 71M 4	0.55	3.8 3.1	1380 1700	9.1	7.1	BE1	4100 11000	10	11.7	8.4		-	-

Figura 48: Selección del motor para el Reactor 01

Fuente: SEW

- **Identificación de esfuerzo (DCL)**

Según [25] el agitador y sus partes son sometidos a la acción de varios esfuerzos. Dichas cargas determinaran las dimensiones adecuadas de los elementos que lo componen:

- **Compresión:** Cuando el agitador se encuentra en funcionamiento ejerce un empuje sobre el fluido, teniendo como resultado un esfuerzo axial, con un sentido contrario al del flujo y en la dirección del eje de rotación.
- **Tracción:** La tracción es el esfuerzo al que es sometido el eje del impulsor por el mismo peso de este.
- El esfuerzo axial es absorbido por tracción o compresión por el eje, donde los machones y sus pernos deben ser capaces de soportar dichos esfuerzos.
- **Torsión:** Al poner en funcionamiento el agitador se producen esfuerzos perpendiculares a las palas los que genera un momento par sobre el eje.
- **Pandeo:** El extremo del eje se encuentra unido fijamente al machón del reductor, provocando en su extremo libre un esfuerzo de pandeo al producirse el giro.

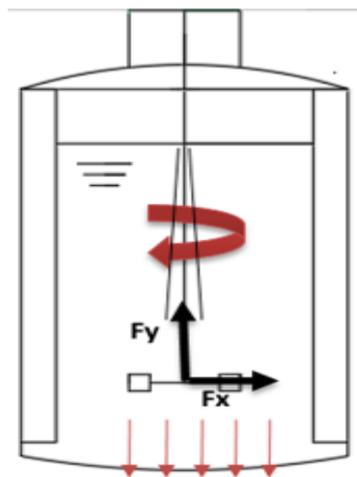


Figura 49: DCL del impulsor  
Fuente: Elaboración propia

### 6.1.1.5 Calculo del momento torsor

Usando la ecuación 4, la potencia transmitida por una flecha que gira a un rpm (**N**) bajo la influencia de un momento aplicado de torsión  $M_t$  es:

$$P = M_t * \omega$$

La ecuación 5 define la velocidad angular como:

$$\omega = 2 * \pi * \frac{N}{60}$$

Al reemplazar la ecuación 5 en la ecuación 4 nos queda la potencia expresada como:

$$P = M_t * \left( 2 * \pi * \frac{N}{60} \right)$$

**Donde:**

$\omega =$  velocidad angular en  $\frac{rad}{s}$

$M_t =$  momento torsor (torque) Nm.

$P =$  potencia, watts

$N =$  Rev/min

Despejando el momento torsor nos queda como

$$M_t = \frac{196}{2 * \pi * \frac{153}{60}} = 12,24 \text{ N m}$$

**Para calcular la fuerza tangencial se usa la ecuación 6**

$$F = \frac{M_t}{r}$$

**Donde:**

$F =$  Fuerza tangencial N

$r =$  radio m

$$F = \frac{12,24}{0,15} = 81,60 \text{ N}$$

### 6.1.1.6 Calculo del momento flector

Con la fuerza encontrada con la ecuación 6 se reemplazará en la ecuación 7 para poder hallar el momento flector

$$M_{f=} F \cdot Le$$

**Donde:**

$M_{f=}$  Momento flector Nm.

$F =$  Fuerza N.

$Le =$  Longitud del eje m

$$M_{f=} 81,60 * 0,49 = 39,98 \text{ N m}$$

### 6.1.1.7 Calculo del diámetro del eje

Con el fin de poder asegurar la rigidez y resistencia a la cual el impulsor estará sometido, se calculó el diámetro del eje que servirá para transmitir la potencia del motor.

Normalmente los ejes son de sección circular y pueden ser huecos o macizos [26].

- Utilización de la norma ASME

Para determinar el diámetro correcto se usó la ecuación del código ASME que son para un eje macizo, como el eje está sometido a esfuerzo de torsión, flexión y bajo carga axial, esta norma las combina, se aplica la ecuación del esfuerzo cortante máximo modificado mediante la introducción de factores de choque, fatiga columna.

La ecuación 8 es para un eje macizo con carga axial ligera o nula:

$$D^3 = \frac{16}{\pi * S_s} * \sqrt{(K_f M_f)^2 + (K_t M_t)^2}$$

**Donde:**

$M_t =$  Momento de torsión, lb-pulg

$M_b =$  Momento de flexión, lb-pulg

$K_b =$  Valores del coeficiente del momento flector

$K_t =$  Valores del coeficiente del momento torsor

$S_s =$  Resistencia admisible

Tabla N° 59: VALORES DE “ $K_s$  Y  $K_m$ ”

TIPO DE CARGA	$K_f$	$K_t$
Ejes de posición fija		
- Carga de manera gradual	1,0	1,0
- Carga de manera repentina	1,5 a 2,0	1,5 a 2,0
Ejes que se mantendrán girando		
- Carga de manera gradual	1,5	1,0
- Carga de manera repentina, con ligero choque	1,5 a <u>2,0</u>	1,0 a <u>1,5</u>
- Carga de manera repentina, con fuerte choque	2,0 a 3,0	1,5 a 3,0

Fuente: Diseño de ejes con la norma ASME, Frank Paul. <https://edoc.site/diseo-de-ejes-con-la-norma-asme-pdf-free.html>

Según [26] el código ASME usa los esfuerzos cortantes para el cálculo de ejes, determinando la resistencia admisible ( $S_s$ ) de dos maneras:

- a) El valor del límite de la fluencia del material en tracción se multiplica por 0,30 expresado en kp/cm<sup>2</sup>.

$$S_s = 0,30 * \sigma_F$$

- b) El valor del límite de la fluencia del material en tracción se multiplica por 0,80 expresado en kp/cm<sup>2</sup>.

$$S_s = 0,18 * \sigma_{rup}$$

Se calculó la resistencia admisible aplicando la ecuación 9 y 10, y se comparan los valores obtenidos, utilizando para el cálculo del diámetro del árbol el que resulte menor de entre ellos.

Si hay chaveta, será el 75% de este valor.

Se utilizará un acero **inoxidable 316** cuyas características son las siguientes. [http://www.acerosotero.cl/acero\\_inoxidable\\_aisi\\_316.html](http://www.acerosotero.cl/acero_inoxidable_aisi_316.html)

- Esfuerzo de fluencia ( $S_y$ )=  $\sigma_F$  = min 205 MPa
- Esfuerzo de ruptura ( $S_r$ )=  $\sigma_{rup}$  = min 515 MPa

**En este caso ( $S_s$ ) toma el minimo valor**

- $0,3 * S_y = 61,5$
- $0,18 * S_r = 92,7$

Se utiliza el valor menor

$$61,5 * 0,75 = 46,12$$

Valores del coeficiente del momento flector ( $K_s$ ) y momento torsor ( $K_m$ ) para la carga ligera de un agitador de fluidos.

Reemplazando los valores en la ecuación 8 se tiene que el diámetro del eje es:

$$D^3 = \frac{16}{\pi * 46,12 * 10^6} * \sqrt{(2 * 39,98)^2 + (1,5 * 12,24)^2}$$

$$D = 0,02085 \text{ m} = \mathbf{20,85 \text{ mm}}$$

Conociendo el diámetro que tendrá el eje para la turbina Rushton R-01 y la altura del eje hasta el tope del reactor es de 38 cm, se consideran unos 7 cm más para el acoplamiento m teniendo una altura total de 45 cm, se diseña el impulsor.

Se seleccionó una barra de acero inoxidable 316 AISI, en el cálculo anterior se obtuvo que el diámetro del eje debe ser de 20,85 mm, debido a que el diámetro del eje debe ser un valor estandarizado en el mercado se selección una barra de 7/8 pulgada equivalente a 22,22 mm.

MEDIDA PULG.	DIÁMETRO MM.	PESO KG./M.	MEDIDA PULG.	DIÁMETRO MM.	PESO KG./M.
1/8	3.17	0.063	7/8	22.22	3.110
3/16	4.76	0.1427	1	25.40	4.064
1/4	6.35	0.254	1 1/4	31.75	6.361
5/16	7.93	0.396	1 1/2	38.10	9.145
3/8	9.52	0.571	1 3/4	44.45	12.442
	12.00	0.900	2	50.80	16.258
1/2	12.70	1.015	2 1/4	57.15	20.577
5/8	15.87	1.5867	2 1/4	63.50	25.403
	16.00	1.608	3	76.20	35.581
3/4	19.05	2.286			

Figura 50: Barra circular de acero inoxidable  
Fuente: Catálogo JAHESA aceros inoxidables

En el programa de solidworks se dibuja el impulsador para el reactor 1, en anexos se detalla los planos.



Figura 51: Turbina Rushton R-1 con eje  
Fuente: Elaboración propia

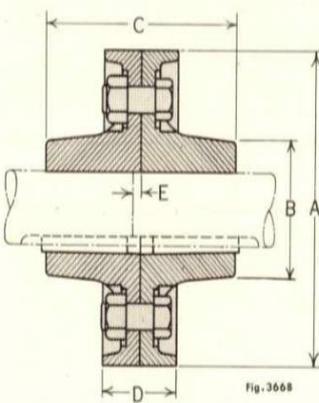
### 6.1.1.8 Acoplamiento superior

El acoplamiento superior es importante para poder unir el eje del agitador con el eje del motor, el tipo de acoplamiento que se seleccionó un acople de platillo, cuyas dimensiones se encuentran estandarizadas en catálogos.

En la figura N° 51 se indican las distancias del cubo en relación al diámetro del eje calculado anteriormente:

Es recomendable que el acople tenga un calado macho/hembra en las caras interiores, con el fin de asegurar la alineación y el centrado de ambos ejes.

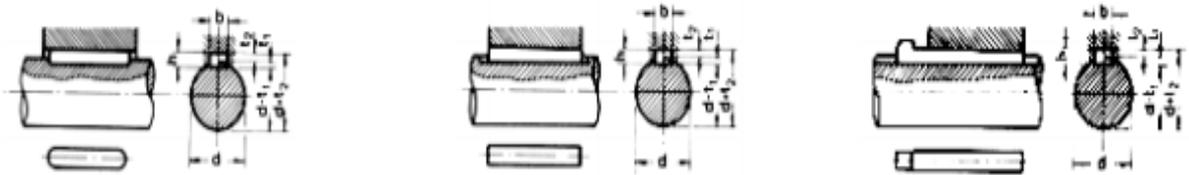
La separación entre los ejes debe de ser de 1 mm.



Shaft diameter, inches	Coupling number★		Weight, pounds		A	B	C	D	E
	Gray iron	Cast steel	Gray iron	Cast steel					
1 5/16	<b>145-11-1</b>	.....	6	...	4 1/2	2	3	1 1/2	3/16
1 3/8	<b>145-11-2</b>	.....	8	...	4 7/8	2 3/16	3 3/4	1 1/2	3/16
1 7/8	<b>145-11-3</b>	.....	13	...	5 3/8	2 5/8	4 1/2	1 3/4	1/4
1 1/2	<b>145-11-11</b>	.....	12	...	5 3/8	2 5/8	4 1/2	1 3/4	1/4
1 11/16	<b>145-11-4</b>	.....	17	...	6 3/8	3 1/8	5	1 3/4	1/4
1 15/16	<b>145-11-5</b>	<b>145-2-E</b>	24	...	7 1/8	3 3/8	6	2 1/4	1/4
2 3/16	<b>145-11-6</b>	<b>145-2-F</b>	33	...	8	4 1/8	6 1/2	2 1/2	1/4
2 7/16	<b>145-11-7</b>	<b>145-2-G</b>	40	44	8 3/8	4 1/2	7 1/4	2 1/2	1/4
2 11/16	<b>145-11-8</b>	<b>145-2-H</b>	49	54	8 7/8	4 3/4	8	2 3/4	1/4
2 15/16	<b>145-11-9</b>	<b>145-2-J</b>	64	70	9 5/8	5 3/16	8 3/4	3	1/4
3 7/16	<b>145-11-10</b>	<b>145-2-K</b>	74	81	10 3/8	6	9	3 1/4	1/4
3 15/16	<b>145-6-13</b>	<b>145-2-L</b>	113	123	12 3/16	7 1/4	10 1/2	4 1/2	1/2
4 7/16	<b>145-6-15</b>	<b>145-2-M</b>	155	169	13 1/2	8 1/4	11 3/8	4 1/2	1/2
4 15/16	<b>145-6-17</b>	<b>145-2-N</b>	201	219	15 1/4	8 7/8	12 5/8	5 1/2	1/2
5 7/16	145-6-18	145-2-P	275	302	16 1/4	9 3/4	13 3/4	5 1/2	3/8
5 15/16	145-6-19	145-2-R	375	412	17 3/4	10 1/2	16 1/4	6	3/8
6 1/2	145-6-20	145-2-T	650	715	21	12 1/2	18 1/2	7 3/4	11/16
7	145-6-21	145-2-V	630	693	21	12 1/2	18 1/2	7 3/4	11/16
7 1/2	145-6-22	145-2-X	1025	1127	24	14 1/4	20 1/4	8 1/2	3/4
8	145-6-23	145-2-Z	994	1093	24	14 1/4	20 1/4	8 1/2	3/4

Figura 52: Dimensiones generales acoplamiento de cara rígida con brida  
Fuente: link Belt , Catalogo 1050 , Elementos de máquina.

### 6.1.1.9 Selección de chaveta.



Chaveta paralela  
S/DIN-6885/1

Chaveta de cuña  
S/DIN-6886

Chaveta de cuña con cabeza  
S/DIN-6887

Ø Eje d (mm) desde- hasta	Medidas chaveta  b x h mm	Medidas del chavetero en el cubo				Medidas del chavetero en el eje para chavetas paralelas y de cuña		Medidas de los ejes en el cubo de la rueda		
		Chaveta paralela S/DIN 6885/1		Chaveta de cuña S/DIN 6886 y 6887		t <sub>1</sub> m/m	Tol. admisible (en altura) m/m	Ø m/m desde- hasta	Tol. H-7 m/m	
		d + t <sub>2</sub> m/m	Tol. Admisible (en altura) m/m	d + t <sub>2</sub> m/m	Tol. admisible (en altura) m/m					
17-22	6x6	d+2,6	+0,1	d+2,1	+0,1	3,5	+0,2	10-18	+0,018 0	
22-30	8x7	d+3,0	+0,2	d+2,4	+0,2	4,1		30-50	+0,025 0	
30-38	10x8	d+3,4		d+2,8		4,7		50-80	+0,030 0	
38-44	12x8	d+3,2		d+2,6		4,9		80-120	+0,035 0	
44-50	14x9	d+3,6		d+2,9		5,5		120-180	+0,040 0	
50-58	16x10	d+3,9		d+3,2		6,2		180-250	+0,046 0	
58-65	18x11	d+4,3		d+3,5		6,8		250-315	+0,052 0	
65-75	20x12	d+4,7		d+3,9		7,4		315-400	+0,057 0	
75-85	22x14	d+5,6		d+4,8		8,5		+0,3	400-500	+0,063 0
85-95	25x14	d+5,4		d+4,6		8,7				
95-110	28x16	d+6,2		d+5,4		9,9				
110-130	32x18	d+7,1	d+6,1	11,1						
130-150	36x20	d+7,9	d+6,9	12,3						
150-170	40x22	d+8,7	d+7,7	13,5						
170-200	45x25	d+9,9	d+8,9	15,3						
200-230	51x28	d+11,2	d+10,1	17						
230-260	56x32	d+12,9	d+11,8	19,3						
260-290	63x32	d+12,6	+0,3	d+11,5	+0,3	19,6				

Figura 53: Dimensiones de la chaveta

Fuente: Catalogo J y M

### 6.1.2 Reactor (R-C2)

- **Datos de entrada**

El reactor (R-C2) debe lograr una agitación rápida y una mezcla homogénea de los reactivos de NaOH y PEG del R-01 y el aceite dieléctrico, será diseñado para tener una capacidad de 0.1374 m<sup>3</sup>, permitiendo tratar 100 litros de aceite dieléctrico con 20 litros de reactivos

El objetivo es que las mezclas de estos reactivos logren la declorinación de los PCB contenidos en aceites dieléctricos.

Tabla N° 60: Densidad y viscosidad de los reactivos

	<b>Densidad</b>	<b>Viscosidad</b>
<b>NaOh</b>	2,13 g/ cm <sup>3</sup>	1 cp = 1mPas =0,001 kg/ms
<b>PEG</b>	1,13 g/ cm <sup>3</sup>	105 – 140 mPas = 0,14 kg/ms
<b>Aceite dieléctrico</b>	0,910 g/cm <sup>3</sup>	170 mPas = 0,17 kg/ms

Fuente: Elaboración propia

En función a estos datos iniciales se desarrollará la propuesta del diseño del agitador.

Tabla N° 61: Datos de entrada para R-C2

<b>Fluido a agitar</b>	NaOH + PEG (poliglicol) + Aceite dieléctrico
<b>Densidad fluido</b>	949 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidad máxima</b>	0,17 kg/ms
<b>Diámetro del reactor</b>	50 cm
<b>Altura del reactor</b>	70 cm
<b>Tapa del reactor</b>	Curva
<b>Fondo</b>	Plano
<b>Altura de relleno</b>	60 cm
<b>Volumen de llenado</b>	0,1374 m <sup>3</sup>
<b>Ancho de aspa</b>	16,5 cm
<b>Altura de aspa</b>	16,5 cm
<b>Longitud del eje del agitador</b>	57 cm

Fuente: Elaboración propia

### **6.1.2.1 Parámetros de diseño para el reactor R-C2**

Para la selección del impulsador tendremos en cuenta que lo que se requiere en el primer reactor es una agitación para fluidos de baja viscosidad. Se seleccionó la de turbina Rushton del tipo turbina de disco de hojas planas 6 hojas planas ya que es el más común, debido a que este tipo de impulsor trabaja fluidos que tengan una baja viscosidad y para medias o altas velocidades. El diseño de este tipo de impulsor resulta más barato y fácil de construir que un impulsor de tipo hélice o de turbina con palas inclinadas

Considerando los requerimientos de diseño para los reactores, que deben soportar la corrosión se definió como material el acero inoxidable del tipo 316 para todos los componentes que estén dentro del reactor.

El eje estará ubicado en el centro del tanque, de forma que, se necesita usar placas deflectoras con el fin de eliminar los vórtices en el fluido.

El volumen del reactor es  $0,1374 \text{ m}^3$ , como parámetros de entrada se especificó una altura en la parte cilíndrica del reactor de 70 cm y un radio de 25 cm

#### ***Ecuación. Definición del volumen del cilindro***

$$V_{cilindro} = \pi * r^2 * h$$

#### **Donde:**

$$r = 25 \text{ cm}$$

$$h = 70 \text{ cm}$$

#### ***Ecuación. Obtención del volumen de la sección cilíndrica del reactor***

$$V_{cilindro} = \pi * r^2 * h$$

$$V_{cilindro} = \pi * (0,25)^2 * m * (0,7) m$$

$$V_{cilindro} = 0,1374 \text{ m}^3$$

### 6.1.2.2 Dimensiones generales del reactor R-C2

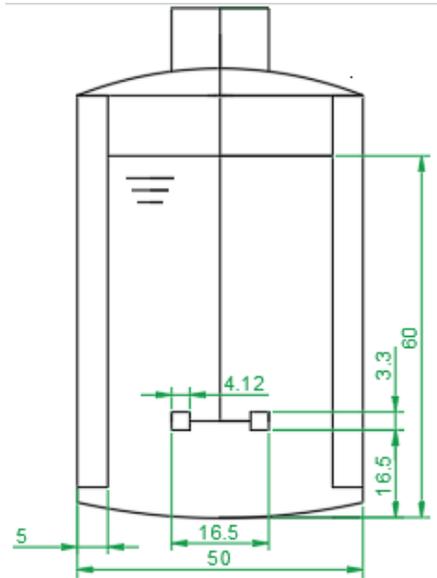


Figura 54: Dimensiones general del reactor R-C2  
Fuente: Elaboración propia

*Para el estanque*

- **Distancia fonda a base del impulsor  $E$**

$$E/Dt = 0,33$$

$$E = 0,33 * 50 = 16,5 \text{ cm}$$

- **Diámetro impulsor ( $Da$ )**

$$Da/Dt = 0,33$$

$$Da = 0,33 * 50 = 16,5 \text{ cm}$$

- **Largo de paleta ( $g$ )**

$$g/Da = 0,25$$

$$g = 0,25 * 16 = 4,125 \text{ cm}$$

- **Ancho de paleta (w)**

$$W/Da = 0,2$$

$$W = 0,2 * 16,5 = 3,3 \text{ cm}$$

- **Dimensiones placas deflectoras**

**Ancho placa (J)**

$$J/Dt = 0,1$$

$$J = 0,1 * 50 = 5 \text{ cm}$$

- **Espacio entre placas y estanque (F)**

$$f/Dt = 0,02$$

$$f = 0,02 * 50 = 1 \text{ cm}$$

Con las dimensiones que fueron calculadas anteriormente se diseñó el reactor R-C2 en el programa Solidworks, en anexos se detallan los planos.



Figura 55: Diseño de R-C2  
Fuente: Elaboración propia

Se diseñó impulsor para el reactor R-02 con las dimensiones obtenidas anteriormente en el programa Solidworks, en anexos se detallan los planos.

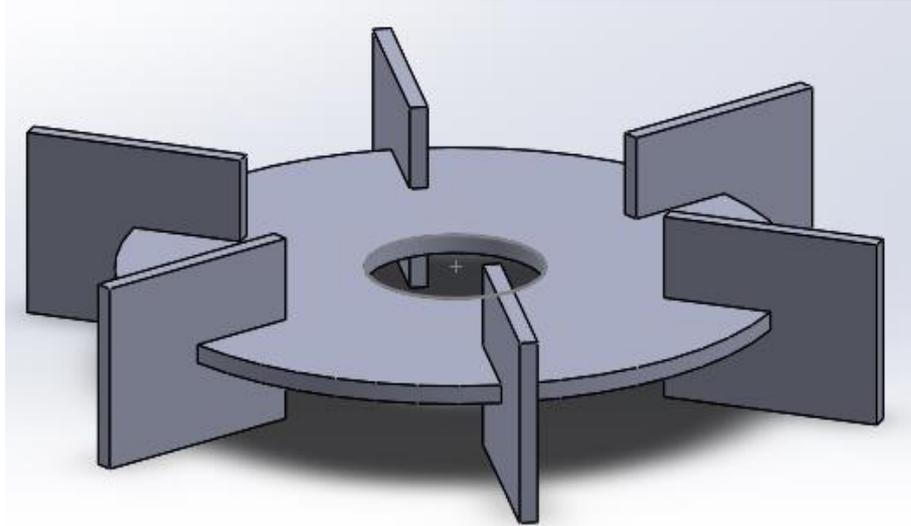


Figura 56: Impulsador para R-C2 Turbina Rushton  
Fuente: Elaboración propia

### 6.1.2.3 Cálculo de potencia en el agitador R-C2

Para poder calcular la potencia consumida del agitador, primero se calculó el número de Reynolds mediante la ecuación 8.

$$Re = \frac{N d^2 \rho}{\mu}$$

#### Datos:

**Densidad de la mezcla ( $\rho$ )**= 949 kg/m<sup>3</sup>

**Viscosidad ( $\mu$ )**= 0,17 kg/ms

**Velocidad angular (N)**= 86 rpm=1,43 rps

**Diámetro del agitador (d)**= 50 cm = 0,5 m

$$\rho_M = (f_v * \rho_v) + (f_b * \rho_b)$$

$$\rho_M = \left( \frac{\frac{\%mezcla}{\rho_{mezcla}}}{\frac{\%mezcla}{\rho_{mezcla}} + \frac{\%aceite}{\rho_{aceite}}} \right) * (\rho_{mezcla}) + \left( \frac{\frac{\%aceite}{\rho_{aceite}}}{\frac{\%mezcla}{\rho_{mezcla}} + \frac{\%aceite}{\rho_{aceite}}} \right) * (\rho_{aceite})$$

$$\rho_M = \left( \frac{\frac{0,164}{1,2157}}{\frac{0,164}{1,2157} + \frac{0,8359}{0,910}} \right) * (1,2157) + \left( \frac{\frac{0,8359}{0,910}}{\frac{0,164}{1,2157} + \frac{0,8359}{0,910}} \right) * (0,910)$$

$$\rho_M = 0,949 \frac{g}{cm^3} = 949 \text{ kg/m}^3$$

Como ya se halló la densidad de la mezcla se reemplazarán valores en la ecuación 8 y se halló el número de Reynolds.

$$Re = \frac{N d^2 * \rho}{\mu}$$

$$2000 = \frac{(N)(0,5)^2 * 949}{0,17}$$

$$N = 1,43 \text{ rps} = 85,8 = 86 \text{ rpm}$$

Utilizando la figura 44, se determinó el número de potencia (Np) interpolando con el número de Reynolds que fue calculado anteriormente, se usara la curva 1 del grafico que es para un impulsor de turbina de 6 palas con cuatro placas deflectoras.

Reemplazando los valores de Np en la ecuación 3 se halló la potencia necesaria.

$$P = Np(N^3 * d^5 * \rho)$$

$$P = 4(1,43^3 * 0,5^5 * 949)$$

$$P = 346,8 \text{ watts} = 0,465 \text{ HP}$$

#### 6.1.2.4 Calculo del momento torsor

Usando la ecuación 4 , la potencia transmitida por una flecha que gira a un rpm (**N**) bajo la influencia de un momento aplicado de torsión  $M_t$  es:

$$W_{flecha} = F * V = F * r * \omega = M_t * \omega$$

La velocidad angular está definida con la ecuación 5

$$\omega = 2 * \pi * \frac{N}{60}$$

Por lo tanto, la potencia transmitida por una flecha que gira a un rpm (**N**) bajo la influencia de un momento aplicado de torsión es:

Al reemplazar la ecuación 5 en la ecuación 4 nos queda la potencia expresada como:

$$P = M_t * \omega = M_t * \left( 2 * \pi * \frac{N}{60} \right)$$

$$M_t = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2 * \pi * \frac{N}{60}}$$

**Donde:**

$\omega = \text{velocidad angular en } \frac{\text{rev}}{\text{s}}$

$M_t = \text{momento torsor (torque) Nm.}$

$P = \text{potencia, watts}$

$$M_t = \frac{347}{2 * \pi * \frac{86}{60}}$$

$$M_t = 38,55 \text{ N.m}$$

Para hallar la fuerza se emplea la ecuación 6

$$F = \frac{M_t}{r}$$

**Donde:**

$F =$  Fuerza tangencial N

$r =$  radio m

$$F = \frac{38,54}{0,25} = 154,20 \text{ N}$$

#### **6.1.2.5.- Calculo del momento flector**

Con la fuerza encontrada con la ecuación 6 se reemplazará en la ecuación 7 para poder hallar el momento flector

$$M_f = F \cdot Le$$

**Donde:**

$M_f =$  Momento flector Nm.

$F =$  Fuerza N.

$Le =$  Longitud del eje m

$$M_f = 154,20 (0,63) = 97,15 \text{ N.m}$$

### 6.1.2.6.- Selección del reductor y motor

Para la selección del motoreductor, se consideraron la potencia y los RPM que fueron calculados anteriormente:

- Potencia: 0,35 KW
- Velocidad necesaria para la agitación: 83 rpm.

Se selección el reductor R17 del catálogo SEW con una entrada de 1400 rpm y una salida de 88 rpm

R17, $n_e = 1400$ 1/min					85 Nm	
$n_a$ [1/min]	$M_{\text{max}}$ [Nm]	$F_{Ra}$ [N]	$\varphi_{(R)}$ [ ' ]	$i$	DR63 DRS71S DRS71M	DRS80
 3						
17	85	1770	-	81.64		
20	85	1770	-	70.39		
21	85	1770	-	65.61		
24	85	1770	-	57.35		
26	85	1770	-	53.76		
30	85	1770	-	47.44		
32	85	1770	-	44.18		
36	85	1770	-	38.61		
39	85	1770	-	36.20		
44	85	1770	-	31.94		
49	85	1770	-	28.32		
58	85	1650	-	24.07		
 2						
55	85	1680	-	25.23		
60	85	1620	-	23.15		
71	85	1500	-	19.71		
82	85	1400	-	16.99		
88	85	1350	-	15.84		
101	85	1270	-	13.84		
108	85	1230	-	12.98		

Figura 57: Selección del reductor para el Reactor 02  
Fuente: Catálogo SEW

Se selección un motor DRS 71S 4 de 0,37 kW del catálogo de SEW

De 4 polos por que los rpm que necesitamos son bajos, y de categoría IE1 porque es de eficiencia estándar.

## 2 Global Motor, 50/60 Hz, 4-Pole

### 4-pole DRS motors for 50/60 Hz, IE1\*

Motor type DRS	P <sub>N</sub> kW	M <sub>N</sub> Nm	n <sub>N</sub> rpm	I <sub>N</sub> A	cosφ	IE class	η <sub>50%</sub> %	η <sub>75%</sub> %	η <sub>100%</sub> %	I <sub>Δ</sub> /I <sub>N</sub>	M <sub>Δ</sub> /M <sub>N</sub>	M <sub>H</sub> /M <sub>N</sub>
DRS 71S 4	0.18	1.25 1.01	1380 1700	0.64 0.45	0.70 0.69	IE1*	- -	- -	- -	3.5 4.2	1.8 1.9	1.8 1.9
DRS 71S 4	0.25	1.72 1.4	1390 1700	0.67 0.62	0.75 0.69	IE1*	68.6 -	72.6 -	72.6 -	4.1 4.2	1.9 1.9	1.9 1.9
DRS 71S 4	0.37	2.55 2.1	1380 1700	1.14 1.06	0.70 0.65	IE1*	69.1 -	65.3 67.7	68.6 68.0	3.5 4.4	1.8 2.1	1.8 2.1
DRS 71M 4	0.55	3.8 3.1	1380 1700	1.55 1.31	0.72 0.68	IE1*	69.1 -	71.9 76.1	70.6 74.0	3.6 4.5	2.1 2.4	2.1 2.3

### 4-pole DRS motors for 50/60 Hz, IE1\*

Motor type DRS	P <sub>N</sub> kW	M <sub>N</sub> Nm	n <sub>N</sub> rpm	m kg	J <sub>Mot</sub> 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	BE..	Z <sub>0</sub> BG BGE 1/h	M <sub>B</sub> Nm	m <sub>B</sub> kg	J <sub>Mot_BE</sub> 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	Global	CEL	ENCE
DRS 71S 4	0.18	1.25 1.01	1380 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	2.5	10.2	6.2		-	-
DRS 71S 4	0.25	1.72 1.4	1390 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	3.5	10.2	6.2		-	-
DRS 71S 4	0.37	2.55 2.1	1380 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	5	10.2	6.2		-	-
DRS 71M 4	0.55	3.8 3.1	1380 1700	9.1	7.1	BE1	4100 11000	10	11.7	8.4		-	-

Figura 58: Selección del motor para el Reactor 02  
Fuente: Catálogo SEW

### 6.1.2.7 Calculo del diámetro del eje

Se utilizará un acero **inoxidable 316** cuyas características son las siguientes.

- Esfuerzo de fluencia ( $S_y$ )=  $\sigma_F$  = min 205 MPa
- Esfuerzo de ruptura ( $S_r$ )=  $\sigma_{rup}$  = min 515 MPa

**En este caso ( $S_s$ ) toma el minimo valor**

$$0,3 * S_y = 61,5$$

$$0,18 * S_r = 92,7$$

Se utiliza el valor menor  $61,5 * 0,75 = 46,12$

Reemplazando los valores en la ecuación 8 se obtiene el diámetro para el eje.

$$D^3 = \frac{16}{\pi * S_s} * \sqrt{(K_f M_f)^2 + (K_t M_t)^2}$$

$$D^3 = \frac{16}{\pi * 46,12 * 10^6} * \sqrt{(2 * 97,15)^2 + (1,5 * 38,55)^2} = 0,02818 \text{ m} = 28,18 \text{ mm}$$

El diámetro del eje se debe ajustar a un valor estandarizado definido según tabla.

Conociendo el diámetro que tendrá el eje para la turbina Rushton R-02 y la altura del eje hasta el tope del reactor es de 50 cm, se consideran unos 7 cm más para el acoplamiento teniendo una altura total de 57 cm, se diseña el impulsor.

Se seleccionó una barra de acero inoxidable 316 AISI, en el cálculo anterior se obtuvo que el diámetro del eje debe ser de 28,18 mm, debido a que el diámetro del eje debe ser un valor estandarizado en el mercado se seleccionó una barra de 1 ¼ pulgada equivalente a 31,75 mm

MEDIDA PULG.	DIÁMETRO MM.	PESO KG./M.	MEDIDA PULG.	DIÁMETRO MM.	PESO KG./M.
1/8	3.17	0.063	7/8	22.22	3.110
3/16	4.76	0.1427	1	25.40	4.064
1/4	6.35	0.254	1 1/4	31.75	6.361
5/16	7.93	0.396	1 1/2	38.10	9.145
3/8	9.52	0.571	1 3/4	44.45	12.442
	12.00	0.900	2	50.80	16.258
1/2	12.70	1.015	2 1/4	57.15	20.577
5/8	15.87	1.5867	2 1/4	63.50	25.403
	16.00	1.608	3	76.20	35.581
3/4	19.05	2.286			

Figura 59: Selección del motor para el Reactor 02

Fuente: Catalogo JNACEROS

El impulsador del reactor 2 se diseñó en el programa de solidworks, en anexos se detallan los planos.

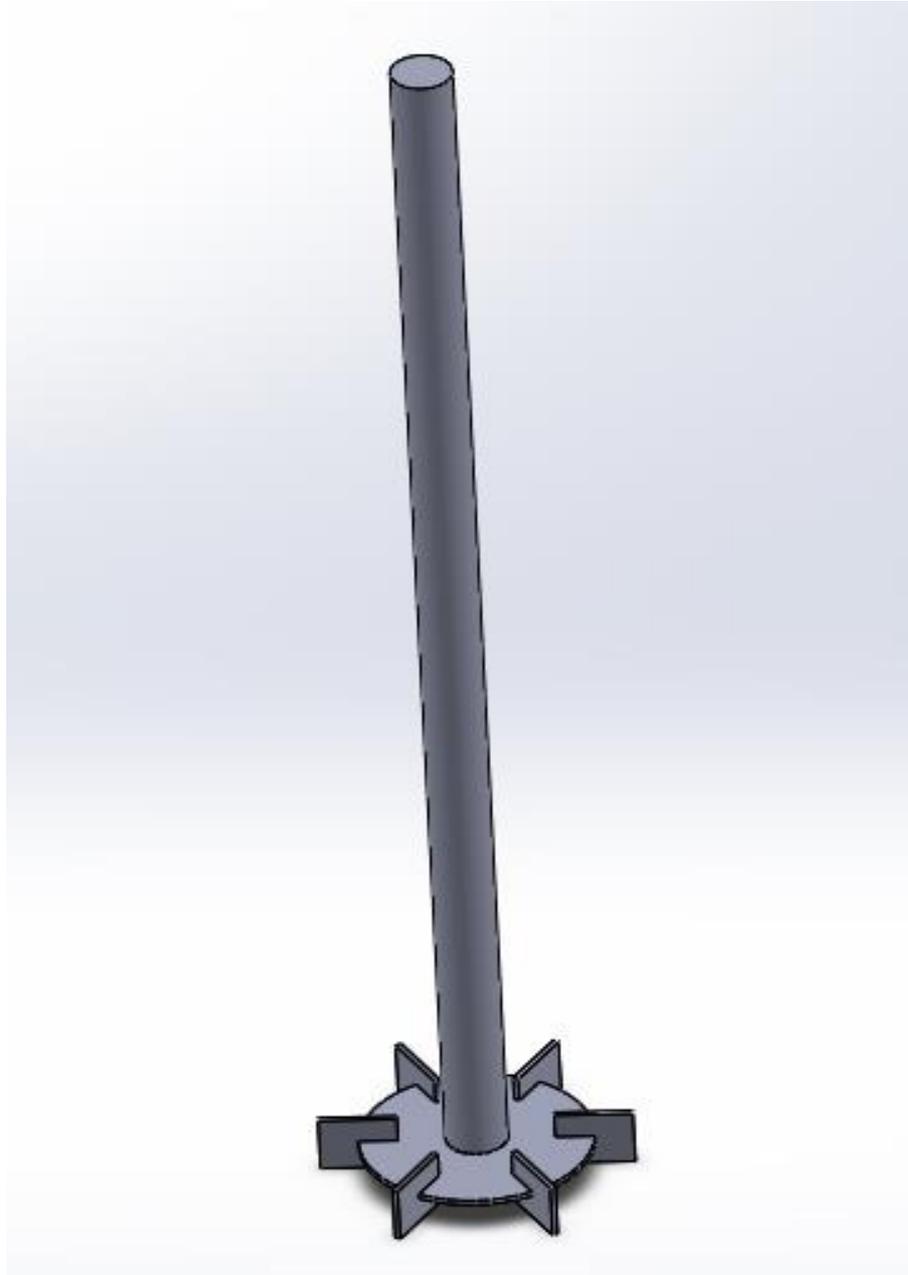
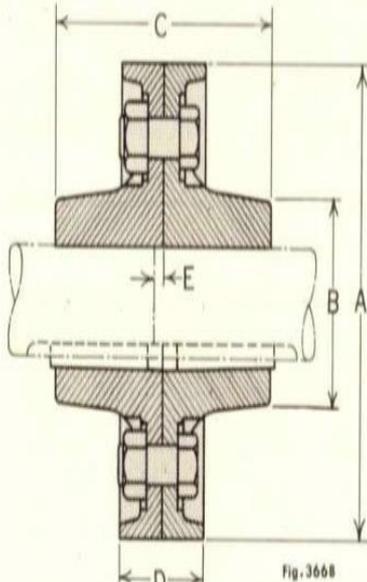


Figura 60: Turbina Rushton R-1 con eje  
Fuente: Elaboración propia

## 6.1.2.8 Acoplamiento superior

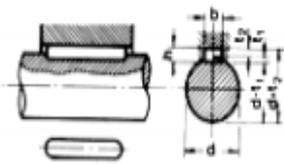


Shaft diameter, inches	Coupling number★		Weight, pounds		A	B	C	D	E
	Gray iron	Cast steel	Gray iron	Cast steel					
1 <sup>5</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-1</b>	.....	6	...	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	2	3	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>3</sup> / <sub>16</sub>
1 <sup>3</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-2</b>	.....	8	...	4 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	2 <sup>3</sup> / <sub>16</sub>	3 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>3</sup> / <sub>16</sub>
1 <sup>7</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-3</b>	.....	13	...	5 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<b>145-11-11</b>	.....	12	...	5 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	1 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
1 <sup>11</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-4</b>	.....	17	...	6 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	3 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	5	1 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
1 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-5</b>	<b>145-2-E</b>	24	...	7 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	3 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	6	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
2 <sup>3</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-6</b>	145-2-F	33	...	8	4 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	6 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
2 <sup>7</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-7</b>	<b>145-2-G</b>	40	44	8 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	7 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
2 <sup>11</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-8</b>	<b>145-2-H</b>	49	54	8 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	4 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	8	2 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
2 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-9</b>	<b>145-2-J</b>	64	70	9 <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	5 <sup>3</sup> / <sub>16</sub>	8 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	3	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
3 <sup>7</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-11-10</b>	<b>145-2-K</b>	74	81	10 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	6	9	3 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	<sup>1</sup> / <sub>4</sub>
3 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-6-13</b>	<b>145-2-L</b>	113	123	12 <sup>3</sup> / <sub>16</sub>	7 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	10 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>1</sup> / <sub>2</sub>
4 <sup>7</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-6-15</b>	<b>145-2-M</b>	155	169	13 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	8 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	11 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>1</sup> / <sub>2</sub>
4 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>	<b>145-6-17</b>	<b>145-2-N</b>	201	219	15 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	8 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	12 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>1</sup> / <sub>2</sub>
5 <sup>7</sup> / <sub>16</sub>	145-6-18	145-2-P	275	302	16 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	9 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	13 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>3</sup> / <sub>8</sub>
5 <sup>15</sup> / <sub>16</sub>	145-6-19	145-2-R	375	412	17 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	10 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	16 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	6	<sup>3</sup> / <sub>8</sub>
6 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	145-6-20	145-2-T	650	715	21	12 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	18 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	<sup>11</sup> / <sub>16</sub>
7	145-6-21	145-2-V	630	693	21	12 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	18 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	<sup>11</sup> / <sub>16</sub>
7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	145-6-22	145-2-X	1025	1127	24	14 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	20 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	8 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>3</sup> / <sub>4</sub>
8	145-6-23	145-2-Z	994	1093	24	14 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	20 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	8 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	<sup>3</sup> / <sub>4</sub>

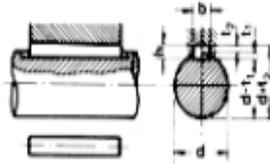
Figura 61: Selección del acoplamiento

Fuente: link Belt, Catálogo 1050, Elementos de máquina.

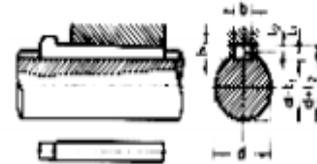
### 6.1.2.9 Selección de chaveta



Chaveta paralela  
S/DIN-6885/1



Chaveta de cuña  
S/DIN-6886



Chaveta de cuña con cabeza  
S/DIN-6887

Ø Eje d (mm) desde- hasta	Medidas chaveta  b x h mm	Medidas del chavetero en el cubo				Medidas del chavetero en el eje para chavetas paralelas y de cuña		Medidas de los ejes en el cubo de la rueda	
		Chaveta paralela S/DIN 6885/1		Chaveta de cuña S/DIN 6886 y 6887		t <sub>1</sub> m/m	Tol. admisible (en altura) m/m	Ø m/m desde- hasta	Tol. H-7 m/m
		d + t <sub>2</sub> m/m	Tol. Admisible (en altura) m/m	d + t <sub>2</sub> m/m	Tol. admisible (en altura) m/m				
17-22	6x6	d+2,6	+0,1	d+2,1	+0,1	3,5	+0,2	10-18	+0,018 0
22-30	8x7	d+3,0		d+2,4		4,1			
30-38	10x8	d+3,4	+0,2	d+2,8	+0,2	4,7		30-50	+0,025 0
38-44	12x8	d+3,2		d+2,6		4,9			
44-50	14x9	d+3,6		d+2,9		5,5		50-80	+0,030 0
50-58	16x10	d+3,9		d+3,2		6,2			
58-65	18x11	d+4,3		d+3,5		6,8		80-120	+0,035 0
65-75	20x12	d+4,7		d+3,9		7,4			
75-85	22x14	d+5,6		d+4,8		8,5		120-180	+0,040 0
85-95	25x14	d+5,4		d+4,6		8,7			
95-110	28x16	d+6,2		d+5,4		9,9	+0,3	180-250	+0,046 0
110-130	32x18	d+7,1		d+6,1		11,1			
130-150	36x20	d+7,9	d+6,9	12,3	250-315	+0,052 0			
150-170	40x22	d+8,7	d+7,7	13,5					
170-200	45x25	d+9,9	d+8,9	15,3	315-400	+0,057 0			
200-230	51x28	d+11,2	d+10,1	17					
230-260	56x32	d+12,9	d+11,8	19,3	400-500	+0,063 0			
260-290	63x32	d+12,6	+0,3	d+11,5			+0,3	19,6	

Figura 62: Dimensiones de la chaveta

Fuente: Catálogo J y M

### 6.1.3 Calentador

El calentador fue diseñado para poder extraer por evaporación el agua contenida en el aceite dieléctrico, el calentador opera a una presión de vacío constante de 123,380 mbar a 65 °C, con capacidad para tratar 100 kg de aceite con un 1% de contenido máximo de agua de 1%.

El deshidratador está compuesto por los siguientes componentes:

- Tanque del proceso
- Bomba de alimentación
- Bomba de extracción
- Calefactor
- Sensor de nivel
- Termocupla

#### 6.1.3.1 dimensionamiento de componentes del calentador

- **Tanque de proceso**

Tanque cilíndrico de montaje vertical con capacidad de 0,117 m<sup>3</sup> con una altura de 60 cm y un radio de 25 cm

#### 6.1.3.2 Análisis de transferencia de masa y calor para el calentador

Se realizó un análisis completo al calentador, se calculó la potencia necesaria que tiene que tener el calefactor para poder extraer el agua del aceite por evaporación, se debe tener en cuenta el calor necesario para calentar el aceite, el calor necesario para evaporar el agua y las pérdidas de calor que se producen hacia el entorno.

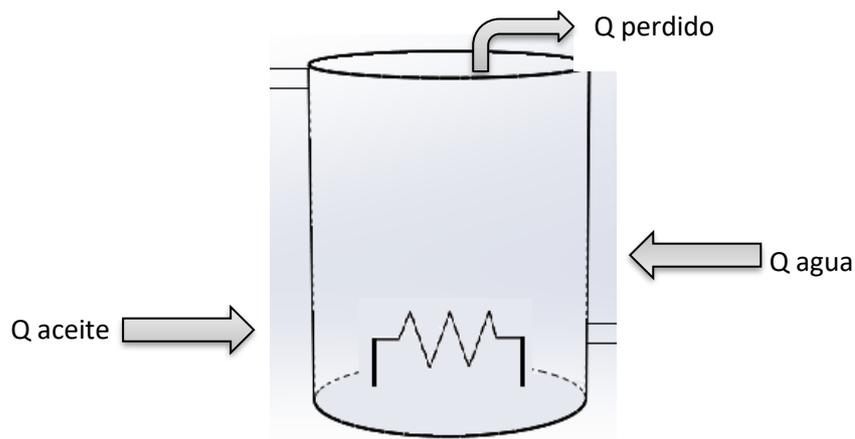


Figura 63: Análisis del calentador

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del calentador, la transferencia de calor es estacionaria, ya que la condición térmica dada en la frontera del cilindro no sufre ningún cambio con la variación del tiempo y unidimensional puesto que existe simetría térmica con respecto al centro del cilindro y no tiene variación en la dirección axial.

Para los cálculos se tuvo en cuenta que la pérdida hacia el entorno se producía a través de la convección en ambos lados, tanto lado interior y exterior, según [27] para este caso se tiene una red de resistencia térmicas, consta de una resistencia a la conducción debido a que el aceite es calentado y este entrega calor a las paredes del cilindro y 2 resistencias a la convección, dado que el cilindro calentado estará expuesto a el aire que corre en el ambiente causando una convección de forma natural o libre, para poder calcular las pérdidas se emplearán las ecuaciones de conducción de calor en cilindros y esferas [27].

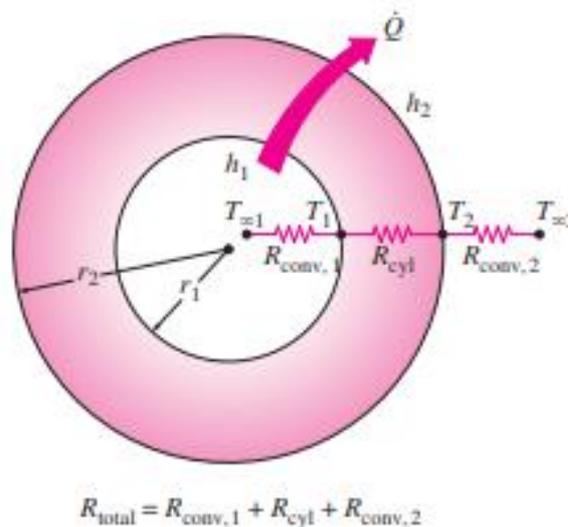


Figura 64: Red de resistencias térmicas para un casco cilíndrico sujeto a convección  
Fuente: Transferencia de masa y calor , Yunus A. Cengel [27]

Con la ecuación 11 se calculó el calor total que se necesita para poder calentar el aceite

$$Q_t = Q_{aceite} + Q_{perdida\ entorno}$$

**Donde:**

$Q_{aceite}$  = Es el calor necesario para calentar el aceite de 20°C a 65°C

$Q_{perdido}$  = Es el calor que se pierde hacia el exterior

- **Calor necesario para calentar el aceite  $Q_{aceite}$**

El calor queda definido con la ecuación 12.

$$Q = m(h_2 - h_1)$$

**Donde:**

$m$  = es la masa de aceite equivalente en kg

$h_1$  = es la entalpia del aceite para  $T_1$

$h_2$  = es la entalpia del aceite para  $T_2$

La diferencia de entalpias está definida con la ecuación 13

$$(h_2 - h_1) = C_p(T_2 - T_1)$$

Reemplazando la ecuación 13 en la ecuación 12 el calor queda expresado como:

$$Q = m * C_p(T_2 - T_1)$$

**Donde:**

$$m = 100 \text{ kg}$$

$$T_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 65^\circ\text{C}$$

$$C_p = 2,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

Masa del aceite m:

El volumen de aceite a tratar es de 100 kg de los cuales el volumen máximo de agua en este será de 0.1% del total, es decir por cada 100 kg de aceite deteriorado tendrá 0,1 kg de agua, por lo tanto.

Reemplazando datos en la nueva ecuación que tiene que el calor del aceite es:

$$Q_{aceite} = 100 \text{ kg} * 2,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} (65 - 20) ^\circ\text{C} = 9900 \text{ kJ}$$

Como se desea calentar el aceite en 30 min

Usando la ecuación 14 se halla la potencia necesaria para calentar el aceite a los parámetros establecidos

$$P_{prom} = \frac{9900 \text{ kJ}}{1200 \text{ s}}$$

$$P_{prom} = 8,25 \text{ kW}$$

- **Calor perdido a través de convección para una capa cilíndrica**

Se usó la ecuación 15 para calcular las pérdidas por convección para una capa cilíndrica:

$$Q_{conv,cil} = \frac{(T1 - T2)}{R_{total}}$$

La ecuación 16 define la red de resistencias como:

$$R_{total} = R_{conv.1} + R_{cil} + R_{conv.2}$$

Donde :

$$R_{total} = \frac{1}{(4\pi * r1^2)h_{ci}} + \frac{r2 - r1}{(4\pi * r1 * r2 * k)} + \frac{1}{(4\pi * r2^2)h_e}$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección natural, tanto para gases y para líquidos fueron seleccionados de la tabla N° 64.

Tabla N° 62: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

VALORES TÍPICOS PROMEDIOS DE $h_c$	
Convección libre	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> .°C)
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección forzada	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> .°C)
Gases	25-250
Líquidos	50-20000

Fuente : Transferencia de masa y calor , Yunus A. Cengel [27]

**Donde:**

$$T_1 = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k = 15 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$h_{ci} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$h_e = 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$r_2 = 0,25 \text{ m radio exterior}$$

$$r_1 = 0,245 \text{ m radio interior}$$

Reemplazando los datos en la ecuación 16 se tiene que:

$$R_{total} = \frac{1}{(4\pi * (0,245 \text{ m})^2) * 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}}} + \frac{0,25 \text{ m} - 0,245 \text{ m}}{(4\pi * 0,245 \text{ m} * 0,25 \text{ m} * 15 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}})}$$

$$+ \frac{1}{(4\pi * (0,25 \text{ m})^2) * 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}}}$$

$$R_{total} = 0,0520 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Para determinar las pérdidas de calor por convección libre e reemplaza el resultado de  $R_{total}$  en la ecuación 15 :

$$Q_{conv,cil} = \frac{(65 - 25)^\circ\text{C}}{0,05268 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}}$$

Se reemplaza:

$$Q_{conv,cil} = 759,30 \text{ Watts}$$

$$Q_{conv,cil} = 0,7593 \text{ kW}$$

Una vez calculado el calor que se necesita para calentar el aceite y el calor que se pierde al entorno, se encuentra el calor total con la ecuación 11

$$Q_t = 8,25 \text{ kW} + 0,7593 \text{ kW} = 9,01 \text{ kW}$$

Se seleccionó una resistencia de inmersión roscado serie Racor M45 x 200 de acero inoxidable con carga útil de 4W/cm<sup>2</sup> que es para aguas y aceites térmicos.



Figura 65: Resistencia tipo rosca  
Fuente: Jara Resistencias S.R.L

Para controlar la temperatura del calentador se usará un termómetro de 0 – 120 °C



Figura 66: Termómetro  
Fuente: Producto Industriales S.R.L

#### 6.1.4 Filtros de tierra fuller

Para los filtros de tierra fuller se seleccionó el método de percolación de tipo torre.

Para tratar 100 litros de aceite dieléctrico se emplearán 30 kg de arcilla bauxita con una porosidad de 30 -60 mesh LVM.

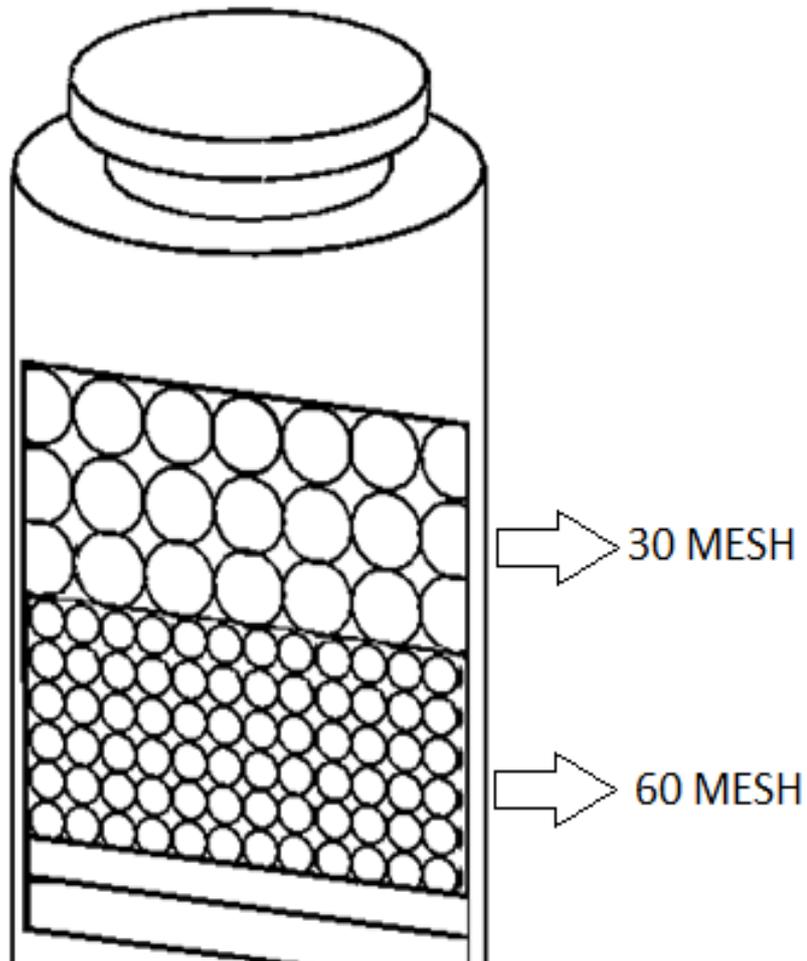


Figura 67: Filtro de tierra fuller  
Fuente: Elaboración propia



Figura 68: Arcilla absorbente  
Fuente: Silica Gel

### Especificaciones

- Este filtro de tierra fuller contarán con aberturas en ambos extremos, que permitan rellenar y extraer la tierra saturada del filtro por la parte inferior.
- Las columnas tienen que tener una válvula para liberar presión.
- Tiene que tener medidores de presión en la entrada del aceite.
- El filtro debe contar con mallas de acero inoxidable para el soporte de la arcilla.

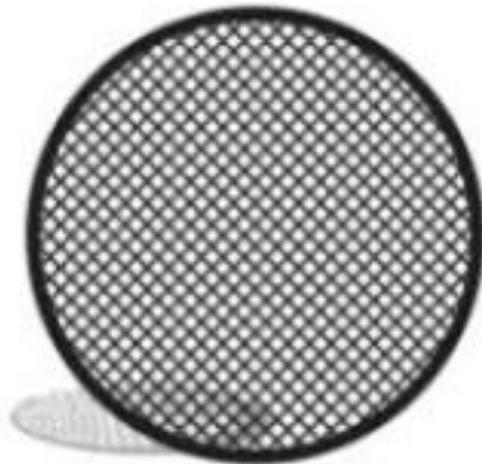


Figura 69: Malla de acero inoxidable  
Fuente: ALNICOLSA del Peru S.A.C

De la tabla N° 63 se seleccionó 1 malla de 60 mesh y 1 de 30 mesh

Tabla N° 63: Medidas estandarizadas de malla de acero inoxidable

Tyler Standard Screen Scale			
Mesh	Microne	Milimetro	Pulgadas
100	147	0.147	0.0057874
80	173	0.173	0.006811
65	208	0.208	0.008189
60	246	0.246	0.009685
48	295	0.295	0.0116142
42	351	0.351	0.0138189
35	417	0.417	0.0164173
30	495	0.495	0.0194882
28	589	0.589	0.023189
24	701	0.701	0.0275984
20	833	0.833	0.0327953
16	991	0.991	0.039016
14	1168	1.168	0.0459843
12	1397	1.397	0.055
10	1651	1.651	0.065

Fuente: ALNICOLSA del Peru S.A.C

***Ecuación. Definición del volumen del cilindro***

$$V_{cilindro} = \pi * r^2 * h$$

**Donde:**

$$r = 12.5 \text{ cm}$$

$$h = 85 \text{ cm}$$

$$V_{cilindro} = \pi * (0,125)^2 m * (0,85) m$$

$$V_{cilindro} = 0,0417 \text{ m}^3$$

Para definir el tamaño de los sólidos contaminantes que se tienen que tratar en el filtro de tierra fuller se tomó como base el informe de un análisis fisicoquímico de un aceite aislante del laboratorio de “Centro de ensayos, innovación y servicios” (anexo), por cada 100 ml de aceite se tuvo como resultados.

Tabla N° 64: Recuento de partículas y distribución por tamaño de un aceite dieléctrico.

<b>Tamaño de partículas</b>	<b>Estimacion al 50 %</b>	<b>Estimacion al 90 %</b>
2,5 - 5 micras	150,000	700,000
5 - 15 micras	65,000	800,000
15 - 25 micras	6,000	90,000
25 - 30 micras	2,000	20,000
50 - 100 micras	200	1,000
> 100 micras	30	100
> 2,5 micras	223,230	1,611,100
> 5 micras	73,230	911,100
> 15 micras	8,230	111,100

Fuente: Centro de ensayos, innovación y servicios, España, Madrid

Tabla N° 65: Propiedades físicas de la Bauxita porocel (alumina activa)

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>	<b>Bauxita Porocel</b>
Gravedad Específica (g/cc)	3,2
Densidad (lb/p <sup>3</sup> )	56-58
Color	Rojo Canela
Calor Específico (BTU/°F)	0,19

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla N° 66: Especificaciones técnicas de la Bauxita porocel (alumina activa)

<b>Especificaciones tecnicas de la Bauxita porocel ( alumina activa)</b>	
<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>
<b>Perdida por secado</b>	6 - 8 %
<b>Humedad residual</b>	≤ 3%
<b>Volumen del poro</b>	0,30 - 0,45 ml/gr
<b>Contenido de humedad</b>	≤ 1,5 %
<b>Resistencia al desgaste</b>	≤ 1,0 %
<b>Adsorcion estarica (HR- 60%) (H2)</b>	≥ 17 %
<b>Superficie de contacto</b>	≥ 300 m2/g
<b>Presion de trabajo</b>	0,7 Mpa - 1 Mpa (100 psi- 145 psi )

Fuente: Centro de ensayos, innovación y servicios, España, Madrid

Tabla N° 67: Resultado de análisis típico de mallas para determinar el diámetro promedio de partícula.

Intervalo de tamaños ( Malla Tyler)	Diametro promedio de partícula (Dp), plg	Fraccion masa retenida % en paso
(-10 + 14)	0,0555	2
(-14 + 20)	0,0394	5
(-20 + 28)	0,0280	10
(-28 + 35)	0,0198	18
(-35 + 48)	0,0140	25
(-48 + 65)	0,0099	25
-65	0,0041	15

Fuente: Principios de operaciones unitarias, Alan S. Fous.

Según [29] la designación que se da para los intervalos de tamaños (-48 + 65) significa que atrapara partículas menores 48 pero mayores a 65. Otro método de designar es 48/65 o que llegara a pasar por la malla 48 y se retiene en malla 65.

Se seleccionó una malla de 30/60 y en base a eso se seleccionó el intervalo (-48 + 65)

El diámetro promedio de la partícula para este intervalo de malla es de 0,0099 pulg.

Usando la ecuación 17 se tiene que el diámetro de la partícula:

$$D_{par} = \frac{6}{A_p/V_p}$$

$$D_{par} = \frac{6 * (\pi * \frac{0,0099^3}{6})}{\pi * 0,0099^2} = 0,0099 \text{ plg} = 0,025 \text{ cm}$$

Para poder determinar la porosidad, primero se determinó con la ecuación 18 la esfericidad de la partícula

$$\Psi = \frac{\pi * (\frac{6}{\pi})^{\frac{2}{3}} * (0,0099^3)^{2/3}}{6 * 0,0099^2} = 0,806$$

Luego de calcular la esfericidad se determinará la porosidad usando la figura 70 donde la esfericidad está en función de la porosidad para lechos de empaque aleatorio de partículas de tamaño uniforme.

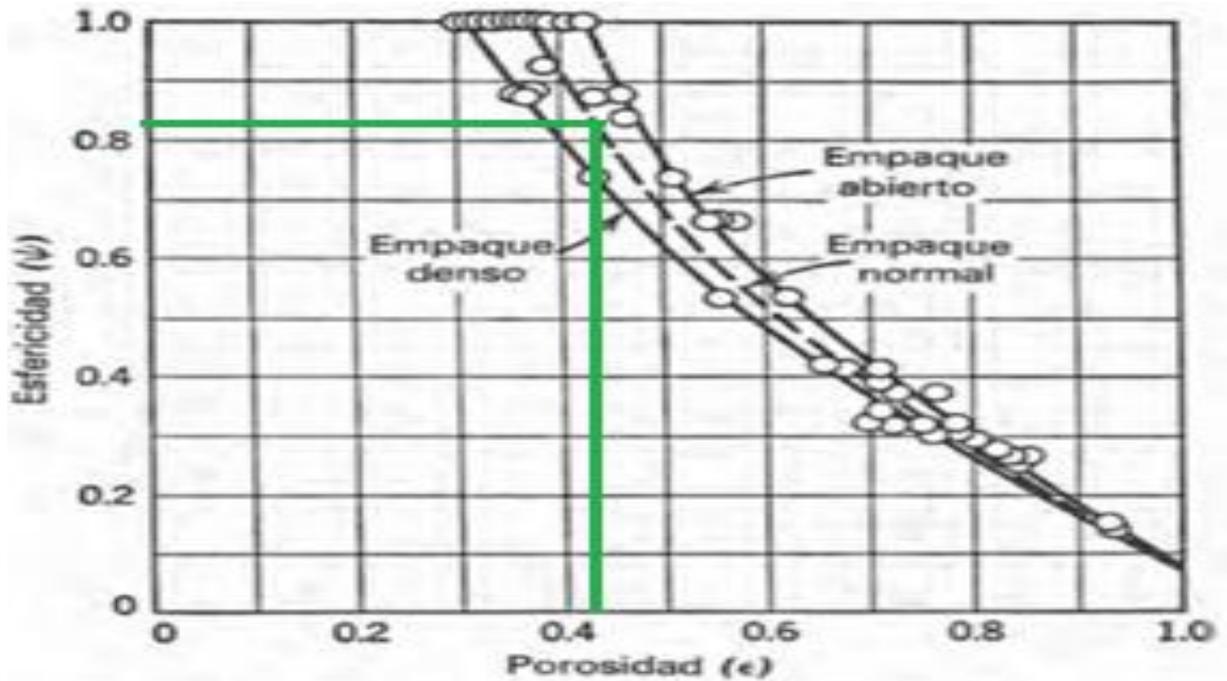


Figura 70: Esfericidad en función de la porosidad  
Fuente: Principios de operaciones unitarias, Alan S. Fous.

La porosidad  $\epsilon = 0,44$

Para poder determinar la velocidad con la que el flujo pasara a través del lecho se empleara la ecuación 19 de Carman-Kozeny

$$f = k1/N_{Re}$$

$$f = \frac{64}{382,2} = 0,1674$$

Tabla N° 68: Valores de gc en varios sistemas de unidades

Sistemas de unidades	Fuerza	Masa	Aceleracion	gc	unidad
Ingles de ingenieria	libra fuerza	libra	pies/s <sup>2</sup>	32,2	lb pie/s <sup>2</sup> lbf
Ingles absoluto	poundal	libra	pies/s <sup>2</sup>	1	lb pie/s <sup>2</sup> poundal
Ingles gravitacional	libra fuerza	slug	pies/s <sup>2</sup>	1	slug-pie/s <sup>2</sup> lbf
Metrico (cgs)	dina	gramo	cm/s <sup>2</sup>	1	g cm/s <sup>2</sup> dina
Sistema internacional	Newton	kilogramo	m/s <sup>2</sup>	1	kg m/s <sup>2</sup> N

Fuente: Principios de operaciones unitarias, Alan S. Fous.

Según [29]  $k_1=64$  y  $k_2=180$  son constantes y se emplea para poder calcular caídas de presión con flujo laminar a través de lechos empacados.

La caída de presión ( $-\Delta P$ ) se determinó con la figura N° 71 con función al número de Reynolds

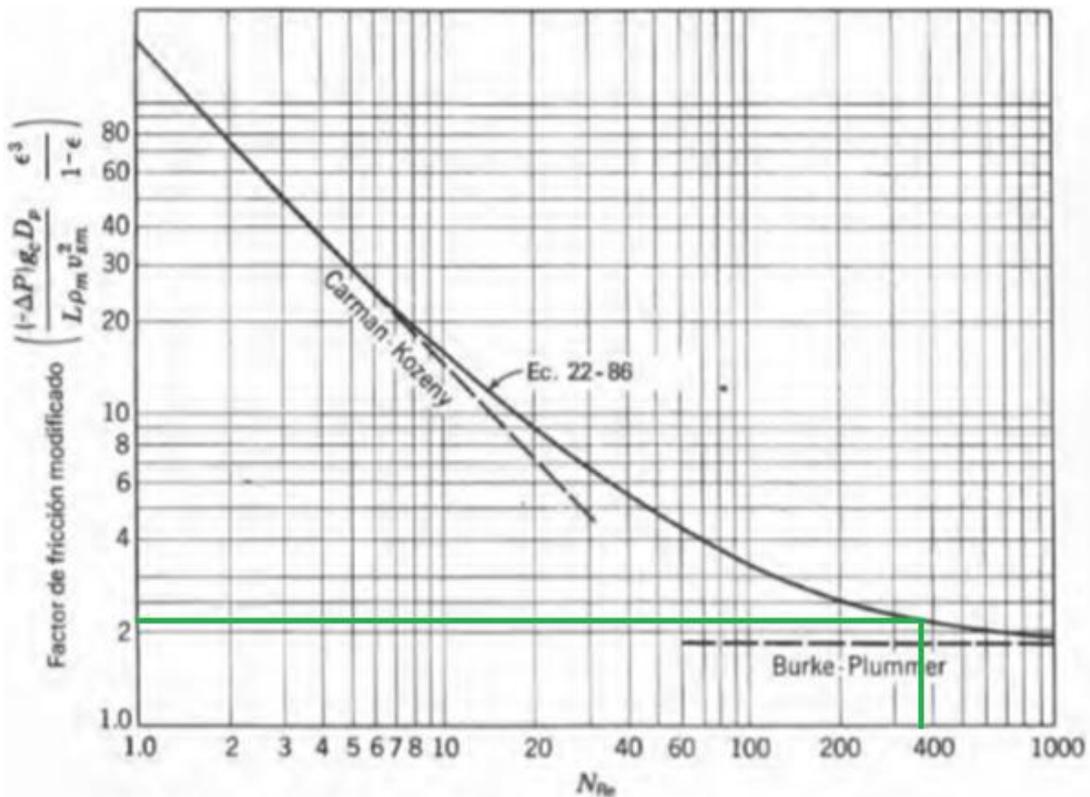


Figura 71: Caída de presión para flujo en lechos empacados  
Fuente: Principios de operaciones unitarias, Alan S. Fous.

**Donde:**

$$(-\Delta P) = 2,3 \frac{lb}{pie^2}$$

$$g_c = 32,2 \frac{pies}{s^2}$$

$$L = 2,78 \text{ pies}$$

$$D_{par} = 0,82 \text{ pies}$$

$$\mu = 411,247 \frac{lb \cdot pie}{h}$$

$$V_{sm} = \text{velocidad superficial a una densidad } , \frac{pies}{s}$$

$$\epsilon = 0,44$$

$$f = 0,1674$$

$$k_2 = 180$$

Con los valores encontrados fueron reemplazados en la ecuación 19, quedando:

$$\frac{\left(2,3 \frac{lb}{pie^2}\right) 0,1674 * 32,2 \frac{pies}{s^2}}{2,78 \text{ pies}} = 180 * \frac{(1 - 0,44)^2 * 411,247 \frac{lb \cdot pie}{h} * \frac{1 h}{3600 s} * V_s}{0,44^3 * (0,82 \text{ pies})^2}$$

$$V_s = 0,039 \frac{pies}{s} = 1,19 \frac{cm}{s}$$

El flujo volumétrico:

$$1,19 \frac{cm}{s} * \left(\frac{60s}{1 \text{ min}}\right) * \left(\frac{0,001 \text{ litros}}{cm^3}\right) = 0,0714 \frac{\text{litros}}{cm^2 * \text{min}}$$

### 6.1.5 Deshidratador

El deshidratador fue diseñado para poder extraer por evaporación el agua contenida en el aceite dieléctrico, el calentador opera a una presión de vacío constante de 0,2980 atm a 70°C, con capacidad para tratar 100 kg de aceite con un 1% de contenido máximo de agua de 1%.

$h = 60 \text{ cm}$

$r = 25 \text{ cm}$

#### 6.1.5.1 Dimensionamiento de componentes del deshidratador

- **Tanque de proceso**

Tanque tendrá forma cilíndrica con extremos bombeados de montaje vertical con capacidad de 0,1 m<sup>3</sup>

El deshidratador está compuesto por los siguientes componentes:

- Tanque del proceso
- Bomba de alimentación
- Boba de extracción
- Bomba de vacío
- Calefactor
- Sensor de nivel
- Termocupla

### 6.1.5.2 Análisis de transferencia de masa y calor para el deshidratador

Se realizó un análisis completo al deshidratador, se calculó la potencia necesaria que tiene que tener el calefactor para poder extraer el agua del aceite por evaporación, se debe tener en cuenta el calor necesario para calentar el aceite, el calor necesario para evaporar el agua y las pérdidas de calor que se producen hacia el entorno.

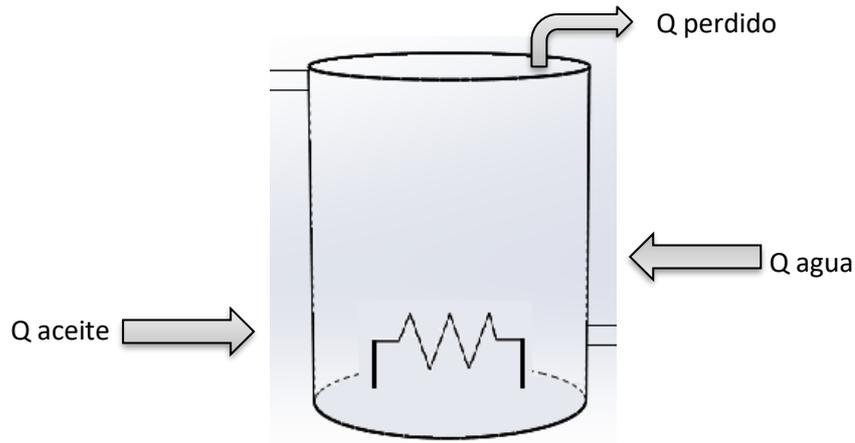


Figura 72: Análisis de transferencia de calor  
Fuente: Elaboración propia

Para el caso del deshidratador, la transferencia de calor es estacionaria, ya que la condición térmica dada en la frontera del cilindro no sufre ningún cambio con la variación del tiempo y unidimensional puesto que existe simetría térmica con respecto al centro del cilindro y no tiene variación en la dirección axial.

Para los cálculos se tuvo en cuenta que la pérdida hacia el entorno se producía a través de la convección natural o libre en ambos lados, tanto lado interior y exterior, según [27] para este caso se tiene una red de resistencia térmicas, consta de una resistencia a la conducción debido a que el aceite es calentado y este entrega calor a las paredes del deshidratador y 2 resistencias a la convección, dado que el cilindro calentado estará expuesto a el aire que corre en el ambiente causando una convección de forma natural o libre, para poder calcular las pérdidas se emplearán las ecuaciones de conducción de calor en cilindros y esferas [27].

De tal manera que el calor total para poder extraer el agua del aceite por evaporación queda expresado en:

$$Q_t = Q_{aceite} + Q_{agua} + Q_{perdida\ entorno}$$

- **Resistencia Eléctrica**

### **Cálculo de la potencia del calefactor**

La potencia que necesita la resistencia para extraer el agua del aceite por evaporación será  $Q_t$   
Con la ecuación 11 se calculó el calor total que se necesita para poder calentar el aceite

$$Q_t = Q_{aceite} + Q_{agua} + Q_{perdidas}$$

**Donde:**

$Q_{aceite}$  = Es el calor necesario para calentar el aceite de 65°C a 70°C

$Q_{agua}$  = Es el calor necesario para calentar el agua de 65°C a 70°C y evaporarla

- **Calor necesario para calentar el aceite  $Q_{aceite}$**

Reemplazando la ecuación 13 en la ecuación 12 el calor queda expresado como:

$$Q = m * C_p(T_2 - T_1)$$

Masa del aceite m:

El volumen de aceite a tratar es de 100 kg de los cuales el volumen máximo de agua en este será de 0.1% del total, es decir por cada 100 kg de aceite deteriorado tendrá 0,1 kg de agua, por lo tanto.

$T_1 = 55^\circ\text{C}$  , temperatura del aceite en el inicio del proceso.

$T_2 = 70^\circ\text{C}$ , temperatura al final del proceso

$h_1$  = Entalpia del aceite para  $T_1$

$h_2$  = Entalpia del aceite para  $T_2$

$C_p = 2,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$  , calor específico del aceite a presión constante

Remplazando estos valores en la ecuación

$$Q_{aceite} = 100 \text{ kg} * 2,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} (70 - 65) ^\circ\text{C} = 1100 \text{ kJ}$$

$$Q_{prom \text{ aceite}} = \frac{1100 \text{ kJ}}{1200 \text{ s}}$$

$$P_{prom \text{ aceite}} = 0,92 \text{ kW}$$

- El calor necesario para evaporar el agua a presión constante de 0,2980 atm

Ya que el agua se desea extraer del aceite a una temperatura no mayor a 70°C, el proceso de evaporación debe ser a la presión de saturación del agua para dicha temperatura según el Nexo (Tabla A4 de termodinámica) La presión que corresponde es 31,202 KPa o 0,31302 bar, dicha presión se mantendrá constante dentro del estanque de proceso.

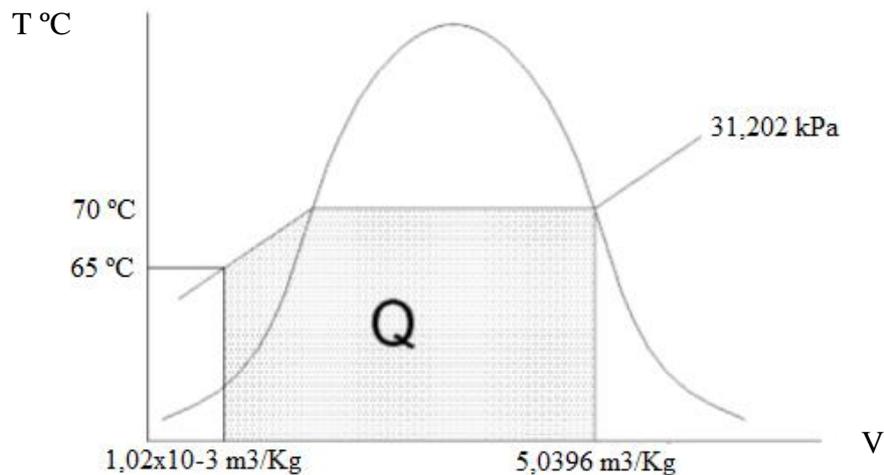


Figura 73: Diagrama T° vs Volumen específico  
Fuente: Elaboración propia

De la primera ley de la termodinámica:

**Donde:**

*m*: masa del agua es de

*h*<sub>1</sub>: Entalpia del agua sub enfriada los 65 °C y atm :230,26 kJ/kg

*h*<sub>2</sub>: Entalpia del vapor saturado hg a los 70 °c y atm : 2626,1 kJ/kg

$$Q_{\text{agua}} = 0,1 \text{ kg} * (2626,1 - 230,26) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 239,84 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{prom}} = \frac{239,84 \text{ kJ}}{1200 \text{ s}} = 0,19 \text{ kW}$$

- **Calor perdido a través de convección para una capa cilíndrica**

**Donde:**

$$T_1 = 75^\circ\text{C} \text{ temperatura del aceite}$$

$$T_2 = 25^\circ\text{C}, \text{ temperatura del entorno}$$

$$k = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \text{ Conductividad termica}$$

$$L = 0,005 \text{ m espesor}$$

$$r_2 = 0,25 \text{ m radio exterior}$$

$$r_1 = 0,245 \text{ m radio interior}$$

Se usó la ecuación 15 para calcular las pérdidas por convección para una capa cilíndrica:

$$Q_{cond,cil} = \frac{(70 - 65)^\circ\text{C}}{R_{total}}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 16 se tiene la red de resistencias como:

$$R_{total} = \frac{1}{(4\pi * (0,245 \text{ m})^2) * 1900 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{C}^\circ}} + \frac{0,25 \text{ m} - 0,245 \text{ m}}{(4\pi * 0,245 \text{ m} * 0,25 \text{ m} * 15 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{C}^\circ})}$$

$$+ \frac{1}{(4\pi * (0,25 \text{ m})^2) * 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{C}^\circ}}$$

$$R_{total} = 0,0526 \frac{\text{C}^\circ}{\text{W}}$$

Para determinar las pérdidas de calor por convección libre e reemplaza el resultado de  $R_{total}$  en la ecuación 15 :

$$Q_{cond,cil} = \frac{(70 - 65)^\circ\text{C}}{0,0526 \frac{\text{C}^\circ}{\text{W}}}$$

$$Q_{cond,cil} = 95,05 \text{ watts} = 0.095 \text{ kW}$$

Una vez calculado el calor que se necesita para calentar el aceite y el calor que se pierde al entorno, se encuentra el calor total con la ecuación 11

$$Q_t = Q_{aceite} + Q_{agua} + Q_{cond,cil}$$

$$Q_t = 0,91 \text{ kW} + 0,19 \text{ kW} + 0,095 \text{ kW}$$

$$Q_t = 1,195 \text{ kW}$$

Potencia del calefactor eléctrico para lograr evaporar el agua contenido en el aceite dieléctrico 0,83 kW

- **Bomba de vacío**

La bomba de vacío es el componente auxiliar más importante del deshidratador, ya que este elemento brinda la presión necesaria para poder extraer el agua del aceite dieléctrico.

Se seleccionó una bomba de vacío de anillo líquido, y se dimensiono en función del vacío que necesita generar y el caudal de aspiración,

- **Dimensionamiento bomba**

Ya definido el tipo de bomba hay que dimensionar esta, en función del vacío o presión final y el caudal de aspiración.

- **Vacío**

La presión final Pf está definida como la presión absoluta de operación a la que se va a evaporar el agua a presión constante

Pf= 31,202 KPa o 0,31202 bar

El vacío Pv es la variación entre la presión de la atmosfera y la presión final

$$P_v = P_a - P_f$$

**Donde:**

Pa=Presión atmosférica = 1,01325 bar

$$P_v = 1,01325 \text{ bar} - 0,31202 \text{ bar}$$

$$P_v = 0,7012 \text{ bar} = 702,12 \text{ mbar}$$

- **Caudal de aspiración**

El volumen de agua que se desea aspirar es igual al definido anteriormente, a continuación, se el caudal de aspiración del agua evapora en el deshidratador y que la bomba extrae del tanque en el tiempo t.

$$Q = \frac{V_{total}}{t}$$

El volumen total del agua que se desea extraer corresponde al volumen específico del vapor a la temperatura de 70 °C por la masa total de agua,

$$V_{total} = V_g * m$$

**Donde:**

$$V_g = 5,0396 \frac{m^3}{kg}$$

$$m = 0,1 \text{ kg}$$

$$V_{total} = 5,0396 \frac{m^3}{kg} * 0,1 \text{ kg}$$

$$V_{total} = 0,50396 \text{ m}^3$$

A continuación, se calculó el caudal que se desea extraer

$$Q = \frac{0,50396 \text{ m}^3}{0,5 \text{ h}}$$

$$Q = 1,0079 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para una masa de agua de 100 gramos, la bomba de vacío necesita poder extraer 1,0079 m<sup>3</sup>/h a una temperatura de 70 °C y a una presión de 0,31202 bar.

- **Selección de bomba de vacío.**

Se seleccionó una bomba de vacío de anillo líquido, de la marca NASH seria Vectra SX5

Rango de vacío: Hasta 33 mbar.

Caudal: Hasta 35 m<sup>3</sup>/h

Potencia: 0,75 kW



Figura 74: Bomba de vacío NASH Vectra SX5  
Fuente: catálogo NASH

### 6.1.6 Cálculo para la selección de las bombas de engranajes

Para la selección de las bombas de engranajes fue necesario hallar diversos cálculos empleando la ecuación 20 (ecuación general de energía), para sistemas en serie, se obtuvo la potencia que necesita la bomba para poder impulsar el fluido.

$$\left( \frac{P1}{\omega} + \frac{V1^2}{2g} + z1 \right) + H_A - H_l = \left( \frac{P2}{\omega} + \frac{V2^2}{2g} + z2 \right)$$

Esta ecuación es la que rige de qué forma se comportara el sistema, donde la velocidad en el punto 1 y 2 se anulan debido a que el fluido está en estado estacionario, los niveles de los tanques ya fueron definidos.

Despejando la ecuación 20, se tiene:

$$H_A = \frac{P2 - p1}{\omega} + (z2 - z1) + H_l$$

Donde  $H_l$  son las pérdidas que se tienen en todo el proceso y por lo general está relacionada con la velocidad del fluido.

Se calculó el caudal con la ecuación 21, donde la sección transversal de la tubería es el área, se considera el radio interno. El caudal es el mismo en todo el trayecto.

- El tiempo de vaciado del transformador = 300 s
- Volumen de aceite = 0,11 m<sup>3</sup>

$$Q = \frac{0,11 \text{ m}^3}{300 \text{ seg}} = 0,000366 \text{ m}^3/\text{s}$$

El diámetro interno mínimo de la tubería es de ½ pulgada (0,0127 m) Para hallar la velocidad del flujo se despeja la ecuación 22 y se tiene que

$$v = \frac{Q}{A}$$

Reemplazando los datos obtenidos del caudal y el diámetro de la tubería se tiene que la velocidad es:

$$v = \frac{0,000366 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi}{4} (0,0127 \text{ m})^2} = 2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Con la ecuación 23 se determinó el número de Reynolds para saber si el flujo es laminar o turbulento.

La viscosidad cinemática del aceite dieléctrico es de 8 cSt = 0,08 cm<sup>2</sup>/s

$$RE = \frac{289 \frac{\text{cm}}{\text{s}} * 1,27 \text{ cm}}{0,08 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}}$$

$$NR = 4587,87$$

- Tramo 1

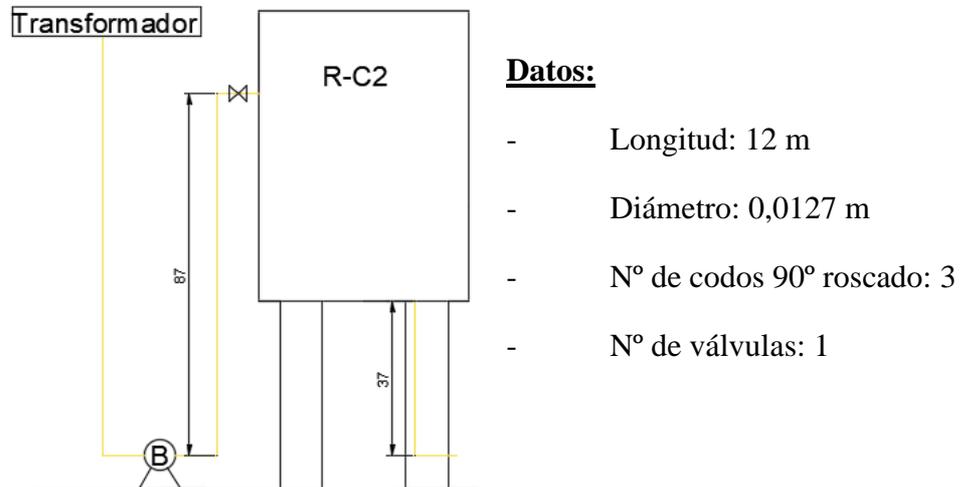


Figura 75: Recorrido de la tubería en el tramo 1  
Fuente: Elaboración propia

La velocidad para la tubería fue establecida:

$$v = \frac{0,000366 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} (0,0127 m)^2} = 2,89 \frac{m}{s}$$

- **Perdidas a la salida del transformador**

Con la ecuación 24 se calculó las pérdidas en la salida del transformador, como el transformador será el depósito que estará conectado a la tubería se toma como la conexión al ras de la pared y según tabla 69: el valor  $k= 0,50$ .

Tabla N° 69: Pérdida de carga según el tipo de accesorio.

Tipos de accesorios	Pérdida de carga media (k)
De depósito a tubería - conexión a ras de la pared (pérdidas a la entrada)	0,50
* Tubería entrante	1,00
* Conexión abocinada	0,05
De tubería a depósito (pérdidas a la salida)	1,00

Fuente: Mecánica de fluidos, Robbert mott [28]

$$h_1 = 0,5 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,213 \text{ m}$$

- **Perdidas en codos y T**

Para el caso de codos y válvulas el coeficiente de resistencia (K) está definida por la siguiente ecuación.

$$K = \frac{Le}{D} * ft$$

Reemplazando el K en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_2 = \frac{Le}{D} * ft * \frac{v^2}{2g}$$

Tabla N° 70 : Longitud equivalente en diámetro de la tubería L/d

<b>Tipos de acoples</b>	<b>Longitud equivalente en diámetro de tubería L/d</b>
Codo estandar a 90°	30
Codo 90° de radio largo	20
Codo roscado a 90°	50
Codo estandar a 45°	16
Codo roscado a 45°	26
T estandar/flujo directo	20
T estandar/flujo en el ramal	60

Fuente: Mecánica de fluidos, Robbert mott [28]

Tabla N° 71: factor de fricción según tamaño nominal de tubería

<b>Tamaño nominal de la tubería (pulg)</b>	<b>Factor de fricción <i>ft</i></b>	<b>Tamaño nominal de la tubería (pulg)</b>	<b>Factor de fricción <i>ft</i></b>
1/2	0,027	3 1/2 , 4	0,017
3/4	0,025	5	0,016
1	0,023	6	0,015
1 1/4	0,022	8 a 10	0,014
1 1/2	0,021	12 a 16	0,013
2	0,019	18 a 24	0,012
2 1/2, 3	0,018		

Fuente: Mecánica de fluidos, Robbert mott [28]

De la tabla 70 se selecciona un codo roscado a 90°  $K=50 ft$  y con la tabla N° 71: se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $ft = 0,027$   
Son 3 codos que se tiene en la tubería por lo tanto nos queda:

$$h_2 = 3 * 50 * 0,027 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1,72 m$$

- **Perdidas por fricción**

Para poder calcular las perdidas fricción, primero se calculó el factor de fricción con la ecuación 26 que es para un flujo laminar.

$$f = \frac{64}{NR}$$

$$f = \frac{64}{4597,35} = 0,014$$

Reemplazando los datos en la ecuación 26 obtenemos las perdidas por fricción

$$h_3 = f * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

**Donde:**

$$L = 12 m$$

$$d = 0,0127 m$$

$$f = 0,014$$

$$v = 2,89 \frac{m}{s}$$

Reemplazando los datos nos queda que:

$$h_3 = 0,014 * \frac{12 m}{0,0127 m} * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 5,6 m$$

- **Perdidas en válvulas**

Las pérdidas en válvulas se calculan con la ecuación 28

$$h_4 = ft * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

Tabla N° 72: Longitud equivalente en diámetro de la tubería L/d

<b>Tipos de Válvulas</b>	<b>Longitud equivalente en diámetro de tubería L/d</b>
Válvula de globo/ abierta por completo	340
Válvula de ángulo/ abierta por completo	150
Válvula de compuerta/ abierta por completo	8
3/4 abierta	35
1/2 abierta	160
1/4 abierta	900
Válvula de verificación / tipo giratorio	100
Válvula de verificación / tipo bola	150
Válvula de mariposa / abierto por completo. 2 a 8 pulg	45
10 a 14 pulg	35
16 a 24 pulg	25

Fuente: Mecánica de fluidos, Robbert mott [28].

Se empleará una válvula tipo globo antes de la entrada del reactor C-02.

Para una válvula tipo globo se tiene  $L/d = 340$  y se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $ft = 0,027$

Reemplazando los datos en la ecuación 28 se tiene que:

$$h_4 = 0,027 * 340 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 3,90 m$$

- **Perdidas a la entrada del reactor Salida de tuberías**

Según [28] recomienda que para este tipo de perdidas el valor de k sea siempre 1, sin tener en cuenta el tipo de conexión de la tubería al reactor.

Reemplazando los datos en la ecuación 24:

$$h_5 = 1 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,425 \text{ m}$$

Luego de haber calculado todas las perdidas, se encontrará el total de pérdidas.

$$h_T = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

$$h_T = 11,86 \text{ m}$$

Las presiones que se toman para este caso son de ambiente:

$$P_2 = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$$

La presión 1 es la presión del fluido y se calculará con la siguiente ecuación:

$$P_1 = \delta \frac{kg}{m^3} * gravedad * altura$$

$$P_1 = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,87 \text{ m}$$

$$P_1 = 8099,4 \text{ Pa}$$

$$- P_2 = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 101325 \frac{N}{m^2}$$

$$- P_1 = 7339,8 \text{ Pa} = 7339,8 \frac{N}{m^2}$$

Se calcula el peso específico del aceite dieléctrico con la ecuación 29, basándonos en la densidad de este.

$$\delta = 949 \frac{kg}{m^3}$$

$$\gamma = \delta * g$$

$$\gamma = 949 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9309,7 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Luego con estos datos se podrá calcular la energía que debe añadir la bomba de engranajes al aceite, es decir se encontrara la carga total sobre la bomba.

La ecuación 20 que fue despejada nos quedó:

$$h_A = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + h_T$$

$$h_A = \frac{101325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} - 8099,4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{9309,7 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} + (11,13 \text{ m}) + 11,86 \text{ m} = 33,01 \text{ m}$$

La potencia que transmite al fluido se calcula con la ecuación 30, se tiene que considerar el caudal, reemplazando los datos en la ecuación, se tiene que:

$$Pot = h_A * \gamma * Q$$

$$Pot = 33,01 \text{ m} * 9309,69 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * 0,000126 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 110,6 \text{ W}$$

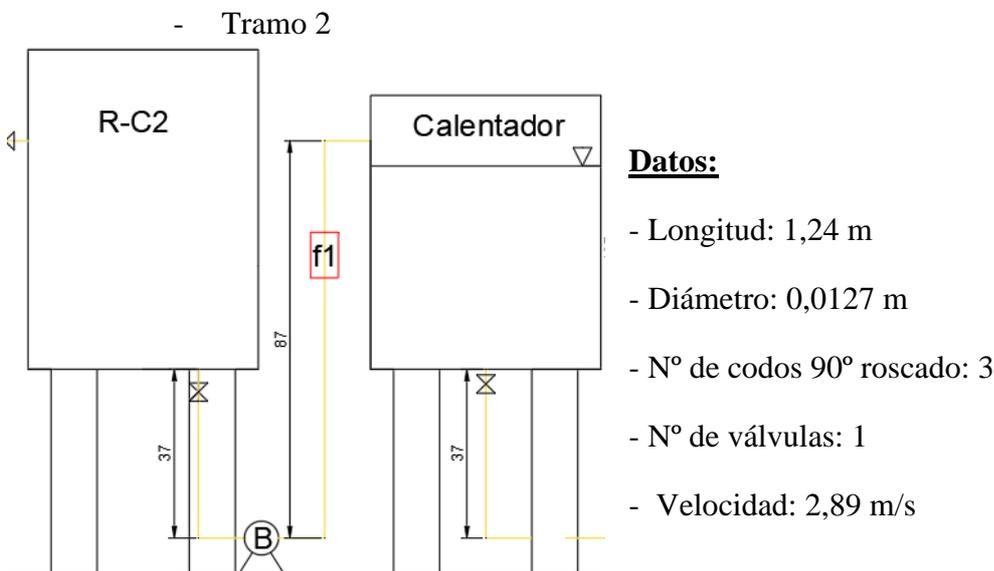


Figura 76: Recorrido de la tubería en el tramo 2  
Fuente: Elaboración propia

- **Perdidas a la salida del transformador**

Se calcula las pérdidas en la salida del transformador, como el transformador será el depósito que estará conectado a la tubería se toma como tubería entrante según la tabla 69: el valor  $k=1,00$ .

Reemplazando los datos en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_1 = 1 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,425 m$$

- **Perdidas en codos y T**

Para el caso de codos y válvulas el coeficiente de resistencia (K) está definida por la siguiente ecuación.

$$K = \frac{Le}{D} * ft$$

Reemplazando el K en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_2 = \frac{Le}{D} * ft * \frac{v^2}{2g}$$

De la tabla 70 se selecciona un codo roscado a 90°  $K=50 ft$  y con la tabla 71 se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $ft = 0,027$ .

Son 3 codos que se tiene en la tubería por lo tanto la ecuación queda

$$h_2 = 3 * 50 * 0,027 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1,72 m$$

- **Perdidas por fricción**

Para poder calcular las pérdidas por fricción, primero se calculó el factor de fricción con la ecuación 26 que es para un flujo laminar.

$$f = \frac{64}{NR}$$

$$f = \frac{64}{4597,35} = 0,014$$

Reemplazando los datos en la ecuación 26 obtenemos las pérdidas por fricción

$$h_3 = f * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

**Donde:**

$$L = 1,24 \text{ m}$$

$$d = 0,0127 \text{ m}$$

$$f = 0,014$$

$$v = 2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reemplazando los datos en la ecuación: obtenemos las pérdidas por fricción

$$h_3 = 0,014 * \frac{1,24 \text{ m}}{0,0127 \text{ m}} * \frac{\left(2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,58 \text{ m}$$

- **Perdidas en válvulas**

Se empleará una válvula tipo globo antes de la entrada del reactor calentador.

Según la tabla 72 Para una válvula tipo globo se tiene  $L/d = 340$  y se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $f_t = 0,023$

Reemplazando los datos en la ecuación 28, se tiene que:

$$h_4 = 0,027 * 340 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 3,90 \text{ m}$$

• **Perdidas a la entrada del reactor Salida de tuberías**

Según [28] recomienda que para este tipo de perdidas el valor de k sea siempre 1, sin tener en cuenta el tipo de conexión de la tubería al reactor.

Reemplazando los datos en la ecuación 24:

$$h_5 = 1 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,425 \text{ m}$$

Luego de haber calculado todas las perdidas, se encontrará el total de pérdidas.

$$h_T = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

$$h_T = 7,06 \text{ m}$$

Se halla la Presión 1 para el tramo 2

$$P1 = \delta \frac{kg}{m^3} * gravedad * altura$$

$$P1 = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,87 \text{ m}$$

$$P1 = 8099,4 \text{ Pa}$$

-  $P2 = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 101325 \frac{N}{m^2}$

-  $P1 = 7339,8 \text{ Pa} = 7339,8 \frac{N}{m^2}$

Se calcula el peso específico del aceite dieléctrico con la ecuación 29, basándonos en la densidad de este.

$$\delta = 949 \frac{kg}{m^3}$$

$$\gamma = \delta * g$$

$$\gamma = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} = 9309,7 \frac{N}{m^3}$$

Luego con estos datos se podrá calcular la energía que debe añadir la bomba de engranajes al aceite, es decir se encontrara la carga total sobre la bomba.

La ecuación 20 que fue despejada nos quedó

$$h_A = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + h_T$$

$$h_A = \frac{101325 \frac{N}{m^2} - 8099,4 \frac{N}{m^2}}{9309,7 \frac{N}{m^3}} + (0,87 m) + 7,06 m = 17,9 m$$

La potencia que transmite al fluido se calcula con la ecuación 30, se tiene que considerar el caudal, reemplazando los datos en la ecuación, se tiene que:

$$Pot = h_A * \gamma * Q$$

$$Pot = 17,9 m * 9309,69 \frac{N}{m^3} * 0,000126 \frac{m^3}{s} = 60,14 W$$

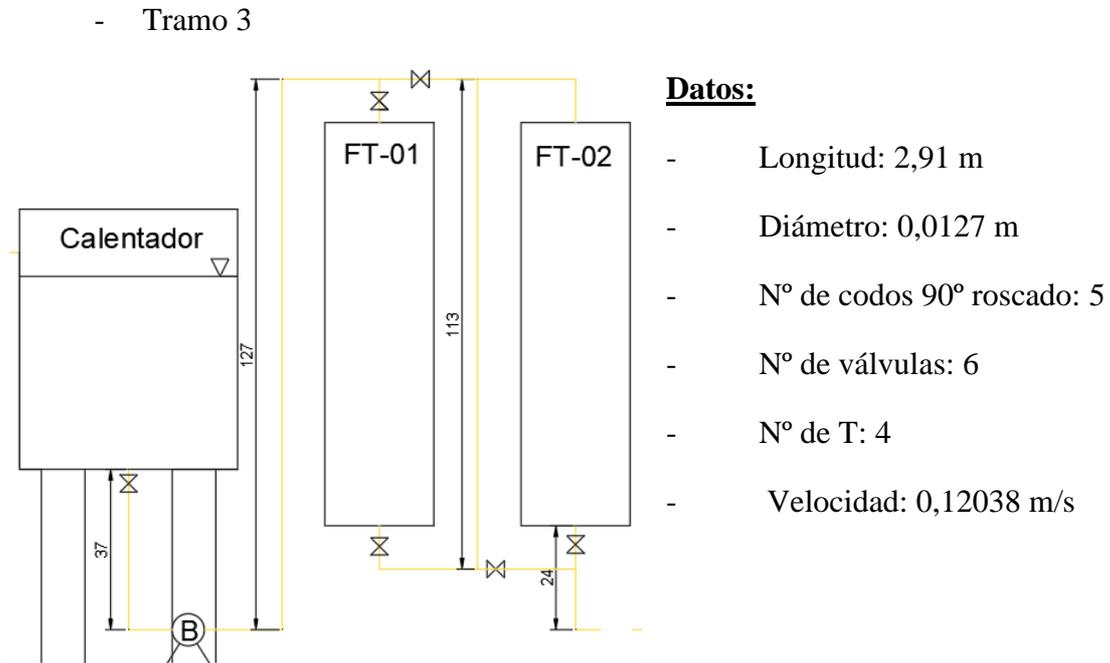


Figura 77: Recorrido de la tubería en el tramo 3  
Fuente: Elaboración propia

- **Perdidas a la salida del transformador**

Se calcula las pérdidas en la salida del transformador, como el transformador será el depósito que estará conectado a la tubería se toma como tubería entrante según la tabla 69 el valor  $k=1,00$ .

Reemplazando los datos en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_1 = 1 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,425 m$$

- **Perdidas en codos y T**

Para el caso de codos y válvulas el coeficiente de resistencia (K) está definida por la siguiente ecuación.

$$K = \frac{Le}{D} * ft$$

Reemplazando el K en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_2 = \frac{Le}{D} * ft * \frac{v^2}{2g}$$

De la tabla 70 se selecciona un codo roscado a 90° K=50 ft y con la tabla 71 se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $ft = 0,027$

Para 9 codos se tiene que:

$$h_{2-1} = 5 * 50 * 0,027 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 2,87 m$$

Se tiene 4 T, según la tabla se secciona las constantes.

2 de flujo directo

$$h_{2-2} = 2 * 20 * 0,027 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,45 m$$

2 flujo desviado a 90°

$$h_{2-3} = 2 * 60 * 0,027 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1,37 m$$

$$h_2 = 2,45 m + 0,4 m + 1,2 m$$

$$h_2 = 4,69 m$$

- **Perdidas por fricción**

Para poder calcular las pérdidas por fricción, primero se calculó el factor de fricción con la ecuación 26 que es para un flujo laminar.

$$f = \frac{64}{NR}$$

$$f = \frac{64}{4597,35} = 0,014$$

Reemplazando los datos en la ecuación 26 obtenemos las pérdidas por fricción.

$$h_3 = f * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

$$h_3 = 0,014 * \frac{2,91 \text{ m}}{0,0127 \text{ m}} * \frac{\left(2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1,35 \text{ m}$$

- **Perdidas en válvulas**

$$h_4 = ft * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

Se empleará una válvula tipo globo antes de la entrada del reactor calentador.

Según la tabla 72 para una válvula tipo globo se tiene  $L/d = 340$  y se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $ft = 0,027$ .

Reemplazando los datos en la ecuación 28, se tiene que:

$$h_4 = 6 * 0,027 * 340 * \frac{\left(2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 23,45 \text{ m}$$

- **Perdidas a la entrada del reactor Salida de tuberías**

Según [28] recomienda que para este tipo de pérdidas el valor de k sea siempre 1, sin tener en cuenta el tipo de conexión de la tubería al reactor.

Reemplazando los datos en la ecuación 24:

$$h_5 = 1 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,425 \text{ m}$$

Luego de haber calculado todas las pérdidas, se encontrará el total de pérdidas.

$$h_T = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

$$h_T = 30,35 \text{ m}$$

Se calcula la presión 1 para el tramo 2

$$P1 = \delta \frac{kg}{m^3} * gravedad * altura$$

$$P1 = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,87 \text{ m}$$

$$P1 = 8099,4 \text{ Pa}$$

-  $P2 = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 101325 \frac{N}{m^2}$

-  $P1 = 7339,8 \text{ Pa} = 7339,8 \frac{N}{m^2}$

Se calcula el peso específico del aceite dieléctrico con la ecuación 29, basándonos en la densidad de este.

$$\delta = 949 \frac{kg}{m^3}$$

$$\gamma = \delta * g$$

$$\gamma = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} = 9309,7 \frac{N}{m^3}$$

Luego con estos datos se podrá calcular la energía que debe añadir la bomba de engranajes al aceite, es decir se encontrara la carga total sobre la bomba.

La ecuación 20 que fue despejada nos quedó

$$h_A = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + h_T$$

$$h_A = \frac{101325 \frac{N}{m^2} - 8099,4 \frac{N}{m^2}}{9309,7 \frac{N}{m^3}} + (1,27 m) + 30,4 m = 41,63 m$$

La potencia que transmite al fluido se calcula con la ecuación 30, se tiene que considerar el caudal, reemplazando los datos en la ecuación, se tiene que:

$$Pot = h_A * \gamma * Q$$

$$Pot = 41,63 m * 9309,69 \frac{N}{m^3} * 0,000126 \frac{m^3}{s} = 139,5 W$$

- Tramo 4

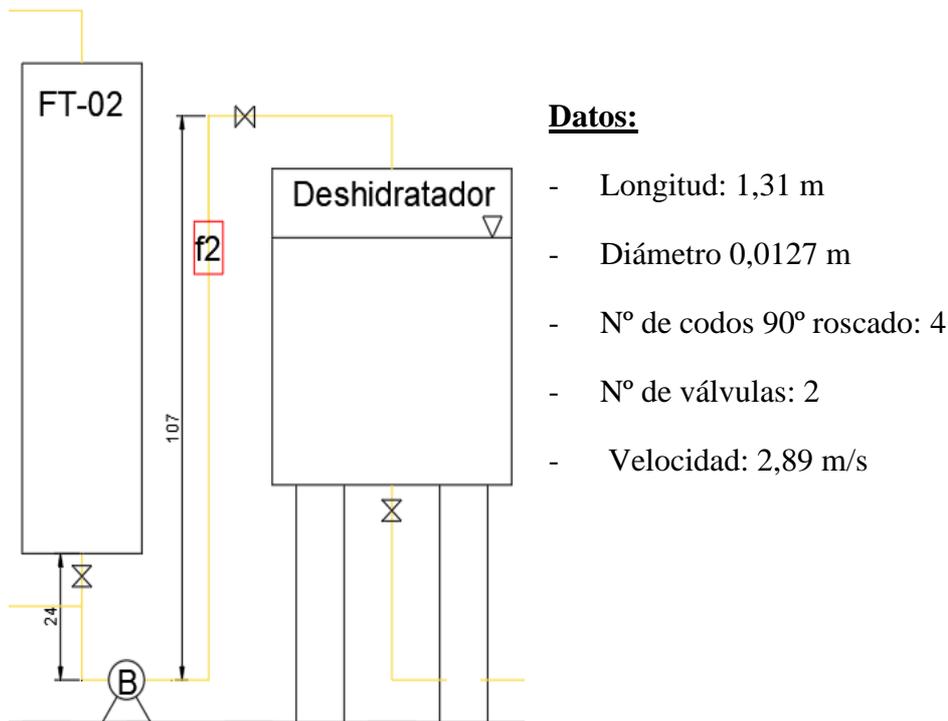


Figura 78: Recorrido de la tubería en el tramo 4  
Fuente: Elaboración propia

• **Perdidas a la salida del transformador**

Se calcula las pérdidas en la salida del transformador, como el transformador será el deposito que estará conectado a la tubería se toma como tubería entrante según la tabla 69 el valor  $k=1,00$ .

Reemplazando los datos en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_1 = 1 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,425 m$$

- **Perdidas en codos y T**

Para el caso de codos y válvulas el coeficiente de resistencia (K) está definida por la siguiente ecuación.

$$K = \frac{Le}{D} * ft$$

Reemplazando el K en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_2 = \frac{Le}{D} * ft * \frac{v^2}{2g}$$

De la tabla 70 se selecciona un codo roscado a 90° K=50 *ft* y con la tabla 71 se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media *ft* = 0,023

Son 3 codos que se tiene en la tubería por lo tanto la ecuación queda

$$h_2 = 4 * 50 * 0,027 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 2,3 m$$

- **Perdidas por fricción**

Para poder calcular las perdidas fricción, primero se calculó el factor de fricción con la ecuación 26 que es para un flujo laminar.

$$f = 0,014$$

Reemplazando los datos en la ecuación 26 obtenemos las perdidas por fricción

$$h_3 = f * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

$$h_3 = 0,014 * \frac{1,31 \text{ m}}{0,0127 \text{ m}} * \frac{\left(2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,611 \text{ m}$$

- **Perdidas en válvulas**

Se empleará una válvula tipo globo antes de la entrada del reactor calentador.

Según la tabla 72 para una válvula tipo globo se tiene  $L/d = 340$  y se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $f_t = 0,023$ .

Reemplazando los datos en la ecuación 28, se tiene que:

$$h_4 = 2 * 0,027 * 340 * \frac{\left(2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 7,81 \text{ m}$$

- **Perdidas a la entrada del reactor Salida de tuberías**

Según [28] recomienda que para este tipo de perdidas el valor de  $k$  sea siempre 1, sin tener en cuenta el tipo de conexión de la tubería al reactor.

Reemplazando los datos en la ecuación 24:

$$h_5 = 1 * \frac{\left(0,12038 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,425 \text{ m}$$

Luego de haber calculado todas las perdidas, se encontrará el total de pérdidas.

$$h_T = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

$$h_T = 11,6 \text{ m}$$

Se calcula la presión 1 para el tramo 4

$$P1 = \delta \frac{kg}{m^3} * gravedad * altura$$

$$P1 = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,87 m$$

$$P1 = 8099,4 Pa$$

$$- P2 = 1 atm = 101325 Pa = 101325 \frac{N}{m^2}$$

$$- P1 = 7339,8 Pa = 7339,8 \frac{N}{m^2}$$

Se calcula el peso específico del aceite dieléctrico con la ecuación 29, basándonos en la densidad de este.

$$\delta = 949 \frac{kg}{m^3}$$

$$\gamma = \delta * g$$

$$\gamma = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} = 9309,7 \frac{N}{m^3}$$

Luego con estos datos se podrá calcular la energía que debe añadir la bomba de engranajes al aceite, es decir se encontrara la carga total sobre la bomba.

La ecuación 20 que fue despejada nos quedó:

$$h_A = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + h_T$$

$$h_A = \frac{101325 \frac{N}{m^2} - 8099,4 \frac{N}{m^2}}{9309,7 \frac{N}{m^3}} + (1,07 m) + 11,6 m = 22,6 m$$

La potencia que transmite al fluido se calcula con la ecuación 30, se tiene que considerar el caudal, reemplazando los datos en la ecuación, se tiene que:

$$Pot = h_A * \gamma * Q$$

$$Pot = 22,6 \text{ m} * 9309,69 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * 0,000126 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 75,9 \text{ W}$$

- Tramo 5

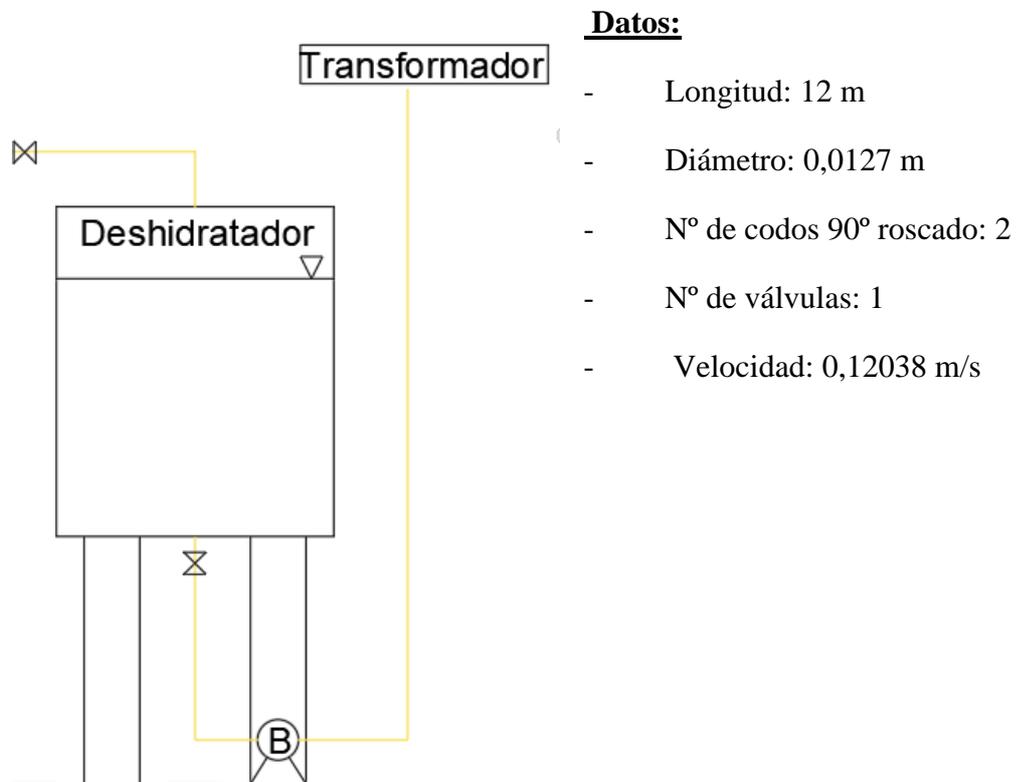


Figura 79: Recorrido de la tubería en el tramo 5  
Fuente: Elaboración propia

- **Perdidas a la salida del transformador**

Se calcula las pérdidas en la salida del transformador, como el transformador será el depósito que estará conectado a la tubería se toma como tubería entrante según la tabla 69: el valor  $k=1,00$ .

Reemplazando los datos en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_1 = 1 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,425 m$$

- **Perdidas en codos y T**

Para el caso de codos y válvulas el coeficiente de resistencia ( $K$ ) está definida por la siguiente ecuación.

$$K = \frac{Le}{D} * ft$$

Reemplazando el  $K$  en la ecuación 24 se tiene que:

$$h_2 = \frac{Le}{D} * ft * \frac{v^2}{2g}$$

De la tabla 70 se selecciona un codo roscado a  $90^\circ$   $K=50 ft$  y con la tabla 71 se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $ft = 0,027$

Son 3 codos que se tiene en la tubería por lo tanto la ecuación queda

$$h_2 = 2 * 50 * 0,027 * \frac{\left(2,89 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1,15 m$$

- **Perdidas por fricción**

Para poder calcular las pérdidas fricción, primero se calculó el factor de fricción con la ecuación 26 que es para un flujo laminar.

$$f = 0,014$$

Reemplazando los datos en la ecuación 26 obtenemos las pérdidas por fricción

$$h_3 = 0,014 * \frac{12 \text{ m}}{0,0127 \text{ m}} * \frac{\left(2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 5,6 \text{ m}$$

- **Pérdidas en válvulas**

$$h_4 = ft * \frac{L}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

Se empleará una válvula tipo globo antes de la entrada del reactor calentador.

Según la tabla 72 para una válvula tipo globo se tiene  $L/d = 340$  y se seleccionó el factor de fricción para una tubería de una pulgada y media  $ft = 0,023$

Reemplazando los datos en la ecuación 28, se tiene que:

$$h_4 = 0,027 * 340 * \frac{\left(2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 3,90 \text{ m}$$

- **Pérdidas a la entrada del reactor Salida de tuberías**

Según [28] recomienda que para este tipo de pérdidas el valor de  $k$  sea siempre 1, sin tener en cuenta el tipo de conexión de la tubería al reactor.

Reemplazando los datos en la ecuación 24:

$$h_5 = 1 * \frac{\left(2,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,425 \text{ m}$$

Luego de haber calculado todas las pérdidas, se encontrará el total de pérdidas.

$$h_T = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

$$h_T = 11,5 \text{ m}$$

Se calculó la presión 1 para el tramo 5

$$P1 = \delta \frac{kg}{m^3} * gravedad * altura$$

$$P1 = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,87 \text{ m}$$

$$P1 = 8099,4 \text{ Pa}$$

$$- P2 = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 101325 \frac{N}{m^2}$$

$$- P1 = 0,7012 \text{ bar} = 70120 \frac{N}{m^2}$$

Se calcula el peso específico del aceite dieléctrico con la ecuación 29, basándonos en la densidad de este.

$$\delta = 949 \frac{kg}{m^3}$$

$$\gamma = \delta * g$$

$$\gamma = 949 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} = 9309,7 \frac{N}{m^3}$$

Luego con estos datos se podrá calcular la energía que debe añadir la bomba de engranajes al aceite, es decir se encontrara la carga total sobre la bomba.

La ecuación 20 que fue despejada nos quedó:

$$h_A = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + h_T$$

$$h_A = \frac{101325 \frac{N}{m^2} - 70120 \frac{N}{m^2}}{9309,7 \frac{N}{m^3}} + (12) + 10,75 m = 26,85m$$

La potencia que transmite al fluido se calcula con la ecuación 30, se tiene que considerar el caudal, reemplazando los datos en la ecuación, se tiene que:

$$Pot = h_A * \gamma * Q$$

$$Pot = 26,85 m * 9309,69 \frac{N}{m^3} * 0,000126 \frac{m^3}{s} = 90,02 W$$

## 6.2 Selección de componentes auxiliares de la máquina

Tabla N° 73: Características del aceite dieléctrico.

<b>Fluido a bombear</b>	Aceite dieléctrico
<b>Densidad fluido</b>	949kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidad máxima</b>	0,17 kg/ms
<b>Temperatura</b>	70°C
<b>Caudal</b>	0,0004 m <sup>3</sup> /s
<b>Presión</b>	1 atm

Fuente: Elaboración propia

El caudal necesario en litros/minuto es:

$$0,0004 \left( \frac{m^3}{s} \right) * \left( \frac{1000 L}{1 m^3} \right) * \left( \frac{60 s}{1 m} \right) = 24 \frac{litros}{minutos}$$

### 6.2.1 Selección de motores de engranajes

Se seleccionó una bomba de engranaje marca Bombas RH serie 25 LM con las siguientes especificaciones técnicas:

- Caudal: 25 litros/minuto a 1500 rpm.
- Aspiración: autoaspirante de 4 metros.
- Tuberías necesarias: 1" Gas.
- Las bocas de entrada salida son de 1" gas hembra.
- Presión con 1HP: 10 bars.
- Temperatura máxima: 180°C (opcional).



Figura 80: Bomba de engranajes marca Bombas RH de 1 hp  
Fuente: Bombas RH

### 6.2.2 Selección de la centrifugadora

Para la separación de sólido-líquido se seleccionó un filtro centrifugo de aceite FM090 de la marca MANN + HUMMEL.



Figura 81: Centrifuga FM090  
Fuente: Catálogo MANN+HUMMEL

Tabla N° 74: Especificaciones técnicas de la centrifuga FM900.

<b>Apto para flujos :</b>	<i>15 a 90 litros</i>
<b>Capacidad de almacenamiento de contaminantes:</b>	<i>0,9 litros</i>
<b>Capacidad de aceite en el rotor:</b>	<i>1,125 litros</i>
<b>Diámetro interno mínimo de la manguera de entrada:</b>	<i>9,5 mm</i>
<b>Diámetro mínimo de la manguera de salida del aceite:</b>	<i>38 mm</i>
<b>Peso neto de la centrifuga FM090:</b>	<i>3,5 kg</i>

Fuente: Catálogo MANN+HUMMEL

### 6.2.3 Selección de filtros

Se seleccionó un filtro de 10  $\mu\text{m}$  hasta 5 mm de marca BOLLFILER simple de tipo 1.03.2



Figura 82: Filtro BOLLFILER simple de tipo 1.03.2  
Fuente: Bollfiler protection systems

Tabla N° 75: Especificaciones técnicas del filtro BOLLFILER.

<b>Diámetro principal</b>	DN 65 hasta 300
<b>Conexiones inline</b>	<i>Si</i>
<b>Elemento filtrante</b>	Cesta filtrante
<b>Grado de filtración</b>	10 $\mu\text{m}$ hasta 5 mm
<b>Presión</b>	PN 10

Fuente: Catálogo BOLLFILER protection systems

El elemento filtrante que se selecciono es de tipo Cesta, para un fácil mantenimiento, la suciedad se acumula en la cesta y puede ser retirada de forma fácil durante la limpieza.



Figura 83: Elemento filtrante tipo cesta  
Fuente: Bollfiler protection systems

### 6.3 Selección de materiales para el ensamble de la máquina:

Para poder realizar la conexión del componente se emplearán tuberías, codos, unión universal, codos, unión T y válvulas de globo, todos estos materiales van a ser de acero inoxidable.

#### 6.3.1 Plancha de acero inoxidable para la fabricación de los reactores

Para el diseño de los reactores se emplea planchas de acero inoxidable 316 AISI, se necesita una plancha de 1500mm\*3000mm y de espesor 1,50mm.

	NORMAS INTERNACIONALES		PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS								
	AISI	N° Acero	N/ mm2	N/mm2	%	HB	0-200°F	0-1000 °f	°C	200°F	500°F
AUSTENÍTICA	J4	1.4003	450-650	280	20	180					
	304	1.4301	540-750	230	45	190	9.6	11.8	870	9.4	12.4
	304L	1.4307	520-670	220	45	190	9.9	10.4	870	9.4	12.4
	310	1.4845	515-700	205	40	200	9	9.7	1045	8.2	10.6
	316	1.4401	530-680	240	40	200	8.9	10.1	870	9.4	12.2
	316L	1.4404	530-680	240	40	200	8.9	10.1	870	9.4	12.3
FERRÍTICA	430	1.4016	450-600	260	20	180	6.1	6.1	900	15.1	15.2

Figura 84: Dimensiones y Presiones de trabajo de tubería inoxidable  
Fuente: Catálogo JAHESA aceros inoxidables

#### 6.3.2 Plancha de acero inoxidable para la fabricación del resto de componentes

Para el diseño de los reactores se emplea planchas de acero inoxidable 304 AISI, se necesita una plancha de 1220mm\*2440mm y de espesor 2,00 mm.

	NORMAS INTERNACIONALES		PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS								
	AISI	N° Acero	N/ mm2	N/mm2	%	HB	0-200°F	0-1000 °f	°C	200°F	500°F
AUSTENÍTICA	J4	1.4003	450-650	280	20	180					
	304	1.4301	540-750	230	45	190	9.6	11.8	870	9.4	12.4
	304L	1.4307	520-670	220	45	190	9.9	10.4	870	9.4	12.4
	310	1.4845	515-700	205	40	200	9	9.7	1045	8.2	10.6
	316	1.4401	530-680	240	40	200	8.9	10.1	870	9.4	12.2
	316L	1.4404	530-680	240	40	200	8.9	10.1	870	9.4	12.3
FERRÍTICA	430	1.4016	450-600	260	20	180	6.1	6.1	900	15.1	15.2

Figura 85: Dimensiones y Presiones de trabajo de tubería inoxidable  
Fuente: Catálogo JAHESA aceros inoxidables

### 6.3.3 Tuberías:

Se seleccionó la tubería de acero inoxidable 304 AISI con costura, con un diámetro de ½ pulgada con tubo de cédula 10.

DIMENSIONES Y PRESIONES DE TRABAJO DE TUBERÍA DE CÉDULA (PIPE) ASTM A312														
Diámetro Nominal NPS	Diám. Ext.		Cédula 10						Cédula 40					
			Grosor Pared		Presión Ing. Trab.		Peso Aprox.		Grosor Pared		Presión Ing. Trab.		Peso Aprox.	
	pg	mm	pg	mm	PSI	kg/m	Lb/pie	kg/m	pg	mm	PSI	kg/m	Lb/pie	kg/m
1/8	.405	10.29	.049	1.24	4270	300	.19	.28	.068	1.73	6170	434	.25	.37
1/4	.540	13.72	.065	1.65	4240	298	.33	.49	.088	2.24	5970	420	.43	.63
3/8	.675	17.15	.065	1.65	3320	233	.42	.63	.091	2.31	4810	338	.57	.85
1/2	.840	21.34	.083	2.11	3420	240	.67	1.00	.109	2.77	4610	324	.85	1.27
3/4	1.050	26.67	.083	2.11	2690	189	.86	1.28	.113	2.87	3750	264	1.13	1.69
1	1.315	33.40	.109	2.77	2830	199	1.40	2.09	.133	3.38	3510	247	1.68	2.50
1 1/4	1.660	42.16	.109	2.77	2210	155	1.81	2.69	.140	3.56	2880	202	2.27	3.39
1 1/2	1.900	48.26	.109	2.77	1920	135	2.09	3.11	.145	3.68	2590	182	2.72	4.05
2	2.375	60.33	.109	2.77	1520	107	2.64	3.93	.154	3.91	2180	153	3.65	5.45
2 1/2	2.875	73.03	.120	3.05	1380	97	3.53	5.27	.206	5.16	2390	168	5.79	8.64
3	3.500	88.90	.120	3.05	1120	79	4.33	6.46	.216	5.49	2070	146	7.58	11.30
3 1/2	4.000	101.60	.120	3.05	980	69	4.97	7.42	.226	5.74	1890	133	9.11	13.58
4	4.500	114.30	.120	3.05	867	61	5.61	8.37	.237	6.02	1750	123	10.79	16.09
6	6.625	168.28	.134	3.4	655	46	9.29	13.85	.280	7.11	1395	98	18.97	28.28
8	8.625	219.08	.148	3.76	555	39	13.40	19.98	.322	8.18	1227	86	28.55	42.57
10	10.750	273.05	.165	4.19	495	35	18.70	27.88	.365	9.27	1113	78	40.48	60.36

Figura 86: Dimensiones y Presiones de trabajo de tubería inoxidable  
Fuente: Catálogo JAHESA aceros inoxidables

#### 6.3.4 Unión universal:

Se colocará este un total de 12 uniones universales en las entradas y salidas de cada componente para facilitar el mantenimiento al momento de querer desmontar los componentes.



Figura 87: Unión universal  
Fuente: Productos Industriales S.R.L

#### 6.3.5 Codo de 90°:

Se usará un total de 17 codos cortos de 90° de acero inoxidable en toda la máquina.



Figura 88: Codo de 90°  
Fuente: Productos Industriales S.R.L

### 6.3.6 Unión Tee:

Se usará un total de 4 uniones tees de acero inoxidable.



Figura 89: Unión tee

Fuente: Productos Industriales S.R.L

### 6.3.7 Válvula de bola

Se usará un total de 10 válvulas de bola de ½ pulgada



Figura 90: Válvula de bola

Fuente: Productos Industriales S.R.L

## 6.4 Tablero de control

La función del tablero de control en la maquina es brindar la conexión de los componentes, poder maniobrar, controlar, proteger, medir y señalar al momento de la operación o proceso. Este tablero ayudará a la protección de las bombas, evitar los cortocircuitos y sobrecargas, permitirá una medición de voltajes, corrientes y antes alguna falla realizar una parada de emergencia.

Un tablero de control eléctrico bien diseñado brinda la seguridad de operación y seguridad al operario, salvaguardando la integridad de la persona contra riesgos eléctricos.



Figura 91: Tablero metálico  
Fuente: Tibox

### 6.4.1 Componentes del tablero de control

El tablero debe contar con elementos que brinden la medición de corriente, de tensión, debe contar con lámparas que indiquen si el sistema está en funcionamiento, debe contar con pulsadores.

Para cumplir con los requisitos el tablero de control de la maquina contara con los siguientes elementos:

- **Contactador:** Es un dispositivo automático que tiene la función de abrir o cerrar circuitos con carga.

Para la selección del contactor se tuvo en cuenta los siguientes factores:

- Tensión y potencia nominales de la carga
- El tipo de arranque del motor
- Tensión y frecuencia reales de la alimentación
- Tensión de aislamiento del contactor



Figura 92: Contactor Schneider  
Fuente: Schneider Electric

- **Relé térmico:** Este dispositivo es de protección contra sobrecargas. Estos accionan cuando alcanza una temperatura establecida provocando que los contactos auxiliares des energicen todo el sistema.



Figura 93: Relé térmico Schneider  
Fuente: Schneider Electric

- **Guardamotor:** Son dispositivos de protección térmica para los motores. Disponen de tres conexiones en la alimentación y 3 de salida para el motor.



Figura 94: Guardamotor Schneider  
Fuente: Schneider Electric

- **6.4.2 INDICADORES Y PULSADORES**

Son todos los dispositivos que tienen como función principal alertar sobre el correcto funcionamiento o paros repentinos en máquinas.

Los pulsadores son componentes que permite al operador abrir o cerrar la alimentación de energía.

De acuerdo al tipo de señal que se emplea se dividen en:

- Acústicas: Sirenas, Timbres, etc.
- Ópticas: Lámparas o pilotos.



Figura 95: Indicadores y pulsadores  
Fuente: Schneider Electric

- **PAROS DE EMERGENCIA**

Este botón tiene la función principal de desenergizar de forma total cualquier circuito.



Figura 96: Indicadores y pulsadores  
Fuente: Schneider Electric

### 6.4.3 DISEÑO DEL TABLERO DE CONTROL

El tablero fue diseñado para controlar principalmente, el funcionamiento de 5 bombas de aceite, y 2 motorreductores con las siguientes características:

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas de las cargas

Tabla N° 76: Datos técnicos de los motores.

	<b>BOMBA ENGRANAJES</b>	<b>MOTOREDUCTOR 1</b>	<b>MOTOREDUCTOR 2</b>
Voltaje	220 V	220 V	220 V
Frecuencia	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Potencia	1 HP o 750 W	0,25 KW	0,37 WK
Amperaje	3,5	0,67	1,14
Factor de potencia	0,8	0,8	0,8

Fuente: Elaboración propia

La distancia máxima que habrá del punto de energía eléctrica hacia nuestra maquina es de 12 metros.

#### 6.4.2.1 CIRCUITOS DE POTENCIA Y CONTROL

El circuito de control lo conforman grupo de elementos o componentes que operan a un dispositivo, a un mecanismo.

Los circuitos de potencia lo forman todos los elementos que están interrelacionados con el fin de lograr realizar un trabajo en función del tiempo, sin incluir los elementos de control previamente descritos. Ya que estos están clasificados como los que operan a un dispositivo.

Los circuitos del tablero de la máquina, se muestra de forma inicial que tiene un interruptor termo magnético general, el cual está asociado con una bobina de disparo por emisión de corriente, la cual permite desenergizar el tablero de forma general en caso de alguna emergencia durante el proceso. Cada motor tendrá su llave termina de forma independiente

El tablero contara con un circuito de luces pilotos con sus interruptores, permitiendo contar con cada fase del proceso señalizada.

- **CIRCUITO DE POTENCIA DE BOMBAS DE ENGRANAJES**

A continuación se muestra el circuito de potencia que corresponde para las 5 bombas (1HP).

El circuito se encuentra detallado en los anexos página 295.

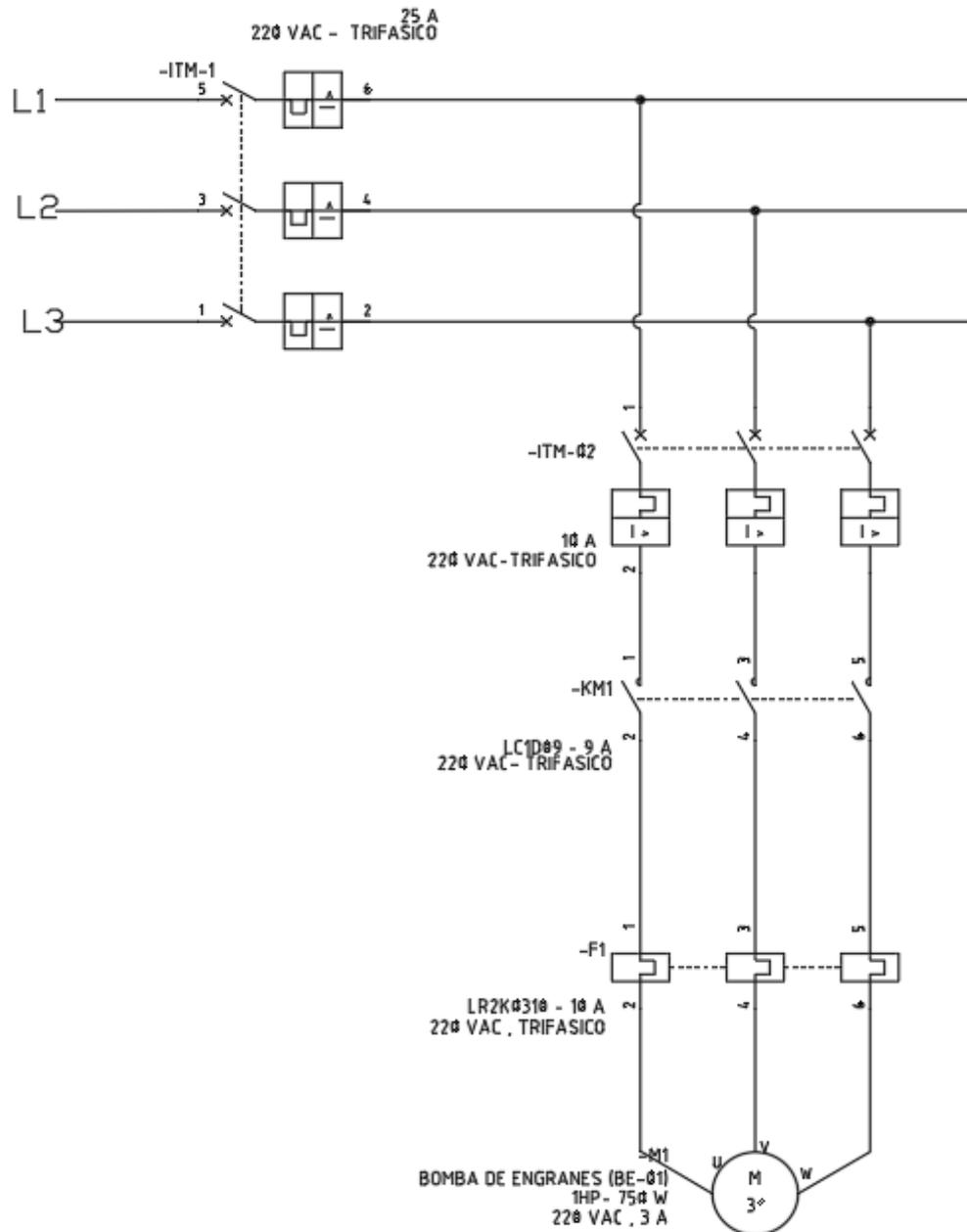


Figura 97: Circuito de potencia motor 1,2,3,4,5  
Fuente: Elaboración propia

- **CIRCUITO DE POTENCIA DE MOTOREDUCTOR 1**

Los circuitos se encuentran detallados en el anexo página 295.

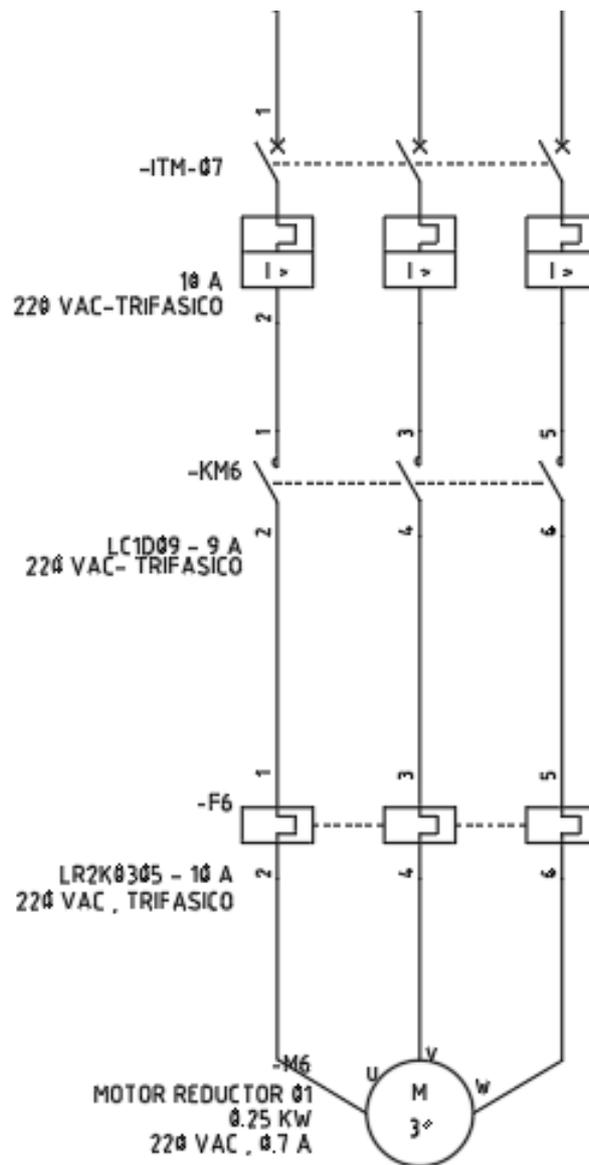


Figura 98: Circuito de potencia motorreductor 1  
Fuente: Elaboración propia

- **CIRCUITO DE POTENCIA DE MOTOREDUCTOR 2**

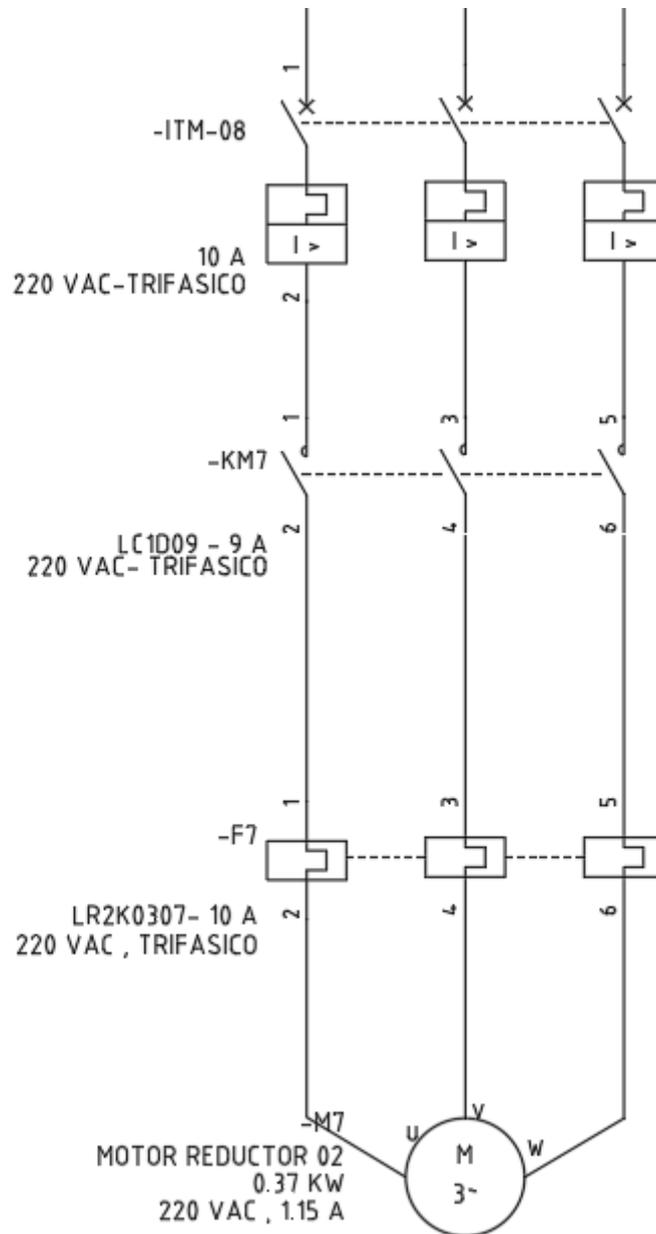


Figura 99: Circuito de potencia motorreductor 2  
Fuente: Elaboración propia

- CIRCUITO DE CONTROL DE LAS BOMBAS DE ENGRANAJES

En la página 294 de los anexos se encuentran los circuitos detallados de la maquina purificadora de aceite.

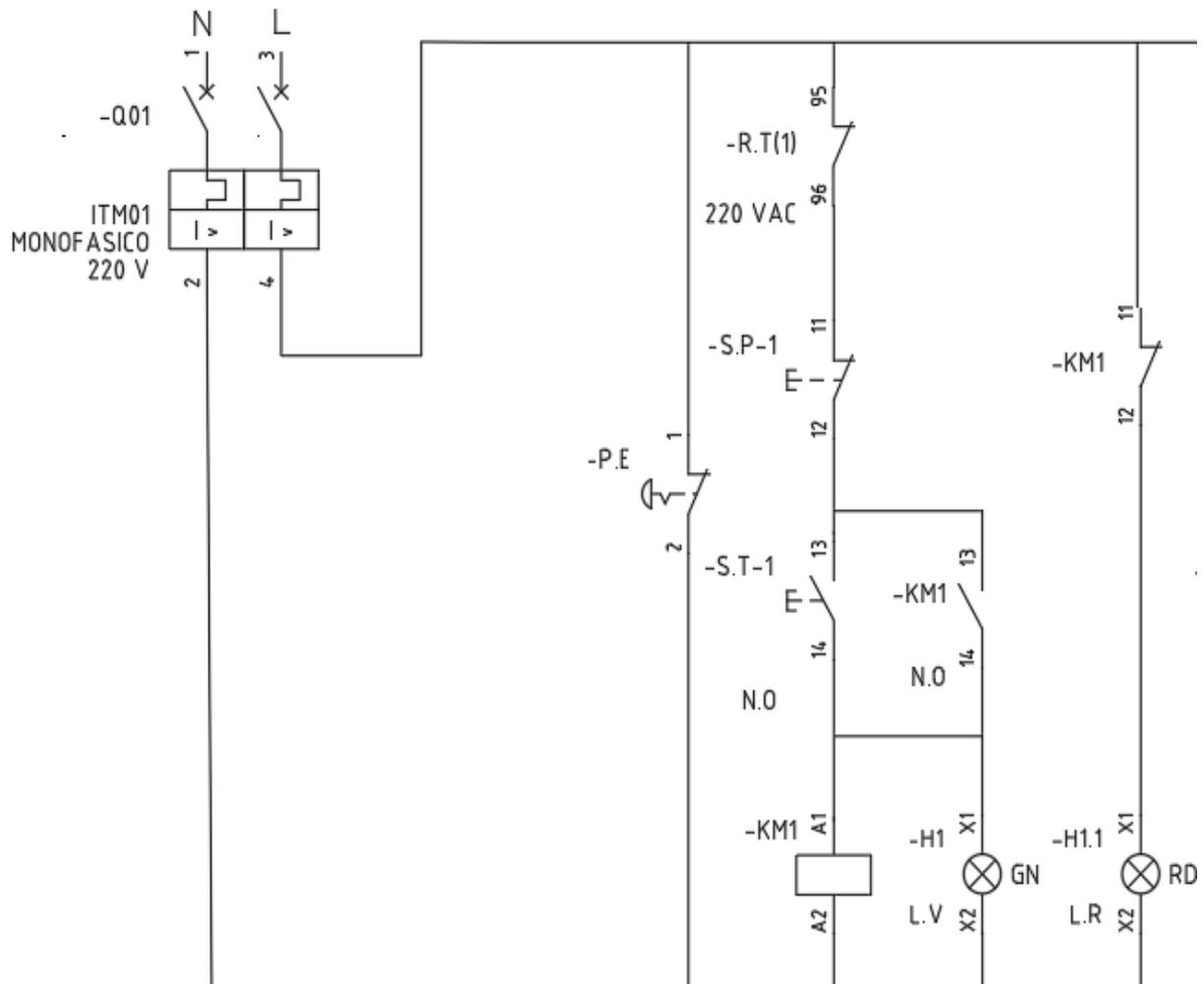


Figura 100: Circuito de control de motor 1,2,3,4,5

Fuente: Elaboración propia

- CIRCUITO DE CONTROL DE MOTOREDUCTOR 1

Los circuitos detallados se encuentran en los anexos, pagina 294.

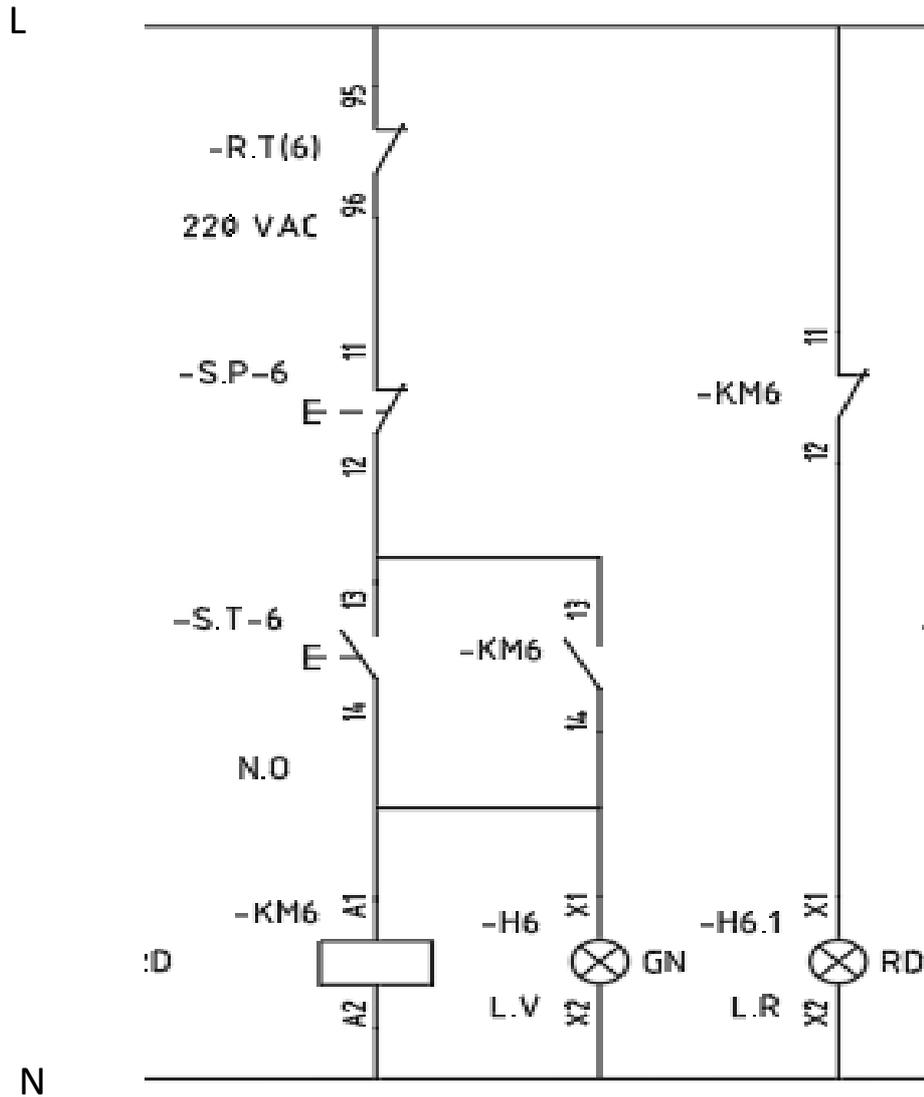


Figura 101: Circuito de control de motorreductor 1  
Fuente: Elaboración propia

- CIRCUITO DE CONTROL DE MOTOREDUCTOR 2

Los circuitos se encuentran detallados en los anexos, pagina 294.

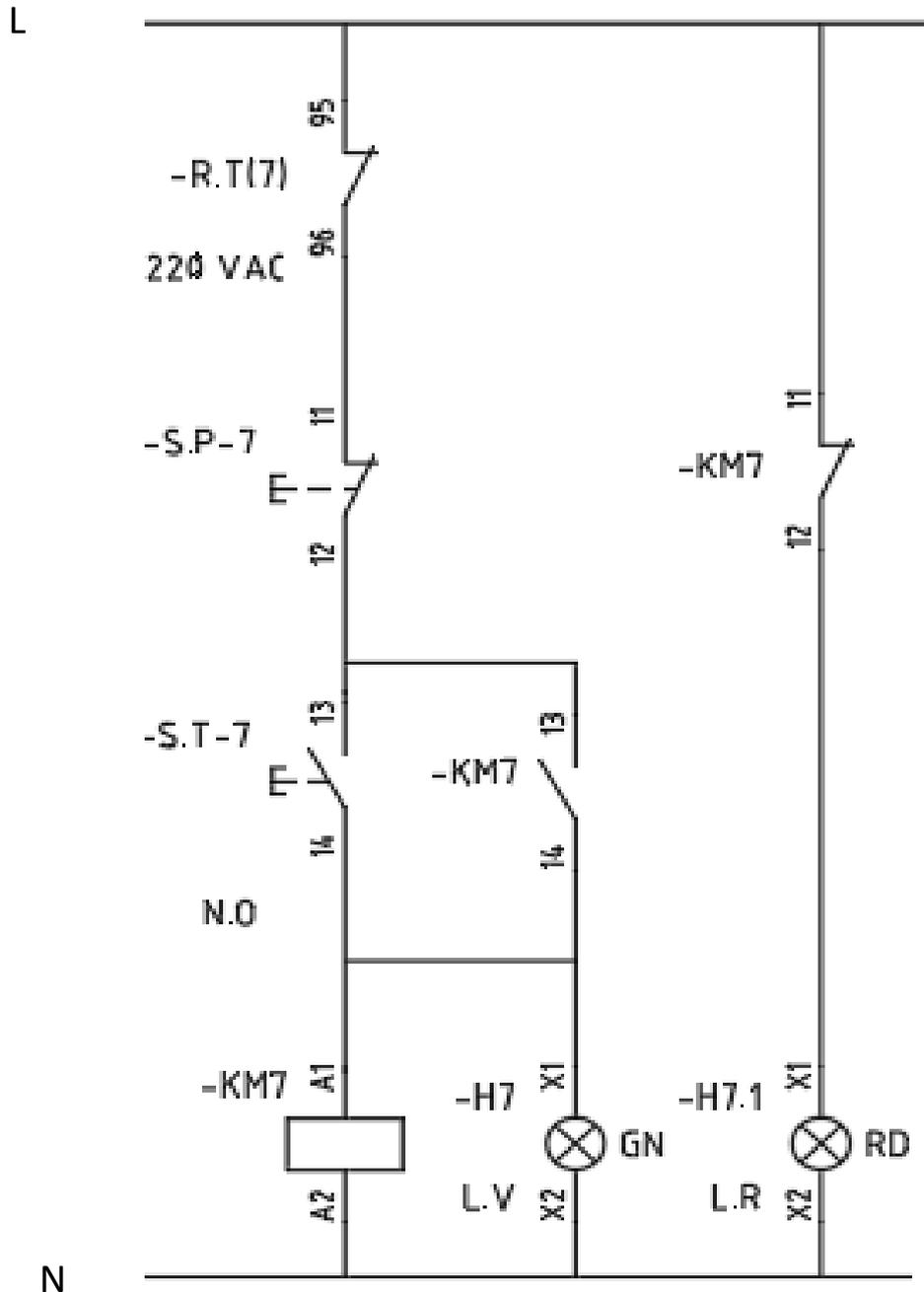


Figura 102: Circuito de control de motorreductor 2  
Fuente: Elaboración propia

### 6.4.2.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES

En esta etapa se procede a seleccionar los componentes del tablero de acuerdo a los circuitos diseñado.

Al seleccionar los elementos a usar en la implementación del tablero se tuvo en cuenta las cargas y demás elementos que serán conectados. Para este caso solo vamos a controlar las bombas de engranajes y los motorreductores.

Con los datos de las especificaciones técnicas se pudo calcular los dispositivos de protección como es la llave termo magnética, los contactores, relé térmico y poder dimensionar los conductores.

A la hora de hacer los cálculos se tiene que tener en cuenta el factor de potencia y el rendimiento de los motores.

- TERMOMAGNETICA GENERAL

$$I_N = \Sigma * I_M + 0,25 * I_{MAYOR}$$

$$I_N = (5 * 3,5) + 0,67 + 1,14 + (0,25 * 3,5)$$

$$I_N = 20,19 A$$

Como la  $I_N$  total fue de 20,19 A , se seleccionó un mini breaker QO325 de 25 A, trifásico.



Figura 103: llave termo magnética general  
Fuente: Schneider Electric

- LLAVE TERMOMAGNETICA MONOFASICA

Para el mando del tablero se usara una llave monofásica de 25 amp 220 vac.



Figura 104: llave termo magnética monofásica  
Fuente: Schneider Electric

- LLAVE TERMOMAGNETICA DE CADA MOTOR

Como la  $I_N$  de cada motor es de 3,5 A , se seleccionó un mini breaker QO310 de 10 A, trifásico.



Figura 105: llave termo magnética trifásica  
Fuente: Schneider Electric

- CONTACTOR

Para la selección de los contactes de tiene que tomar en cuenta la capacidad que tiene que establecer, soportar e interrumpir la corriente.

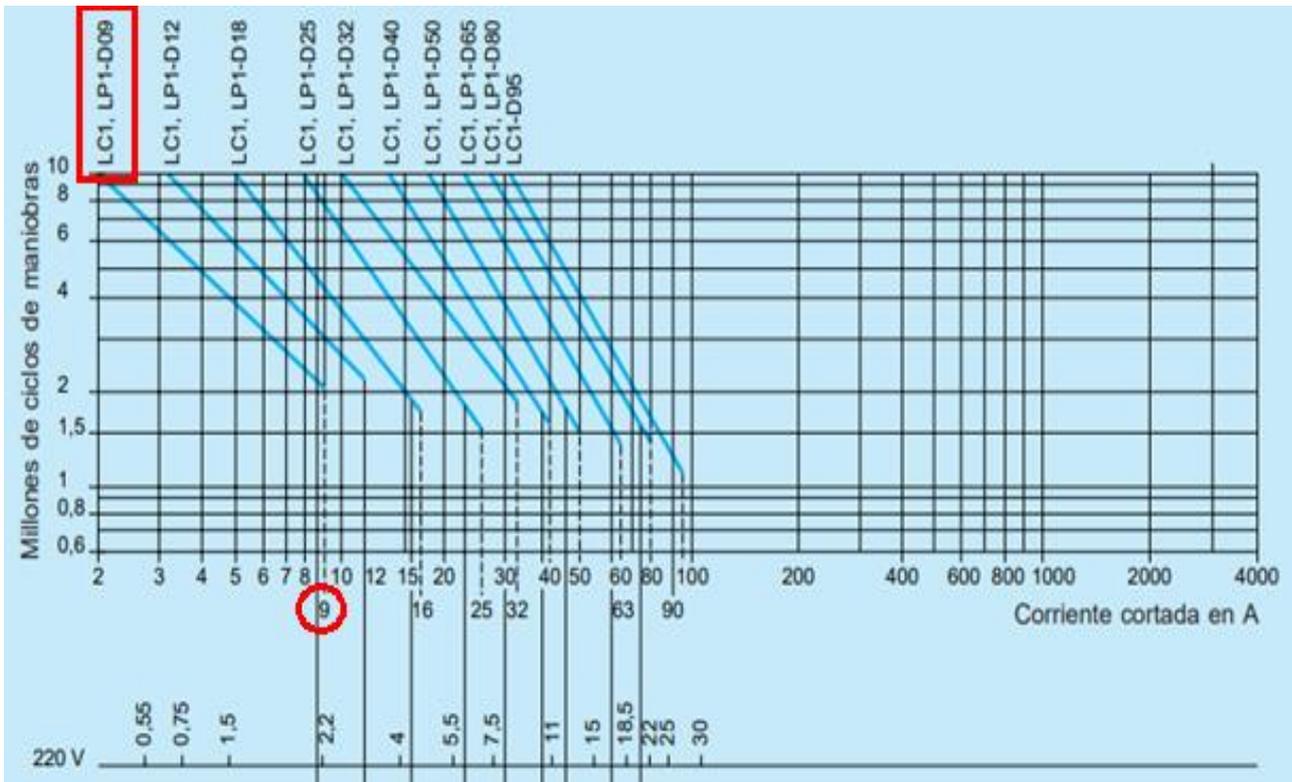


Figura 106: Grafico para selección de contactores  
Fuente: Manual electrotécnico Shneider

Debido a que son cargas muy bajas se selecciona el contactor de menor capacidad LC1D09P7 TRIFASICO DE 9 A

- RELÉ TÉRMICO

El relé térmico que se selecciono fue superior a la corriente calculada, debido a que conforme pasen los años, el motor tiende a consumir un poco más de corriente.

5 Relé termo magnético LR2K0310 (2,6...3,7 A - class 10A)

1 LR2K0305TeSys K - differential thermal overload relays – 0,54...0,8 A - class 10A

1 LR2K0307TeSys K - differential thermal overload relays – 1,2...1,8 A - class 10A

- CONDUCTORES

La caída de voltaje en los conductores no debe ser muy elevado, debe siempre tomarse en cuenta los datos de placa del motor a instalar, por lo cual primero se calculó la sección de los conductores.

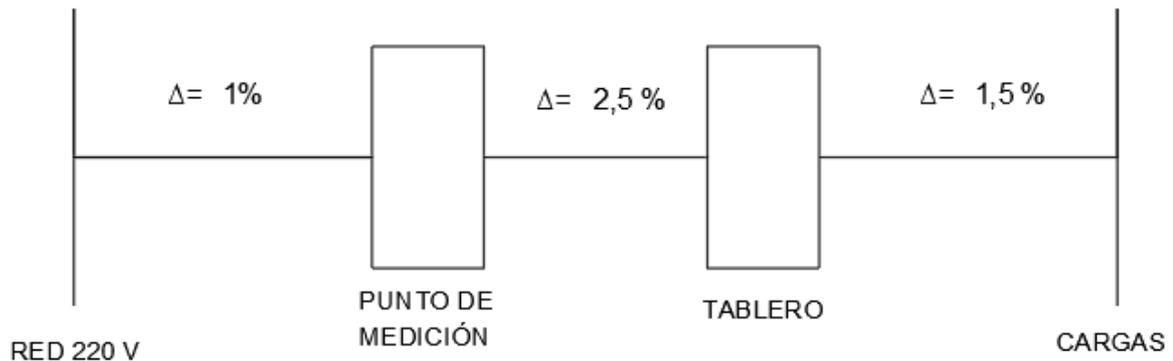


Figura 107: gráfico para calcular caída de voltaje

Fuente: Elaboración propia.

$$I = \frac{W}{\sqrt{3} * V * \cos\phi} \quad (\text{Trifasico})$$

Se calcula la caída de tensión en voltios:

$$\Delta V = \frac{k * \rho * \Sigma I_M * \cos\phi * L}{S}$$

Donde:

$I$  = Corriente total

$W$  = Potencia en Watts

$V$  = Tensión de servicios en voltios

$K$  = Factor que depende si el suministro trifasico

$\rho$  = Resistencia del conductor en ohm  $-\frac{mm^2}{m}$  para el cobre = 0,175 ohm  $-\frac{mm^2}{m}$

$S$  = Sección del conductor alimentador en mm<sup>2</sup>

$L$  = Distancia desarrollada en metros

$\cos\phi$  = Factor de potencia

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} * (0,0175) * (5 * 3,5) * 0,85 * 12}{4}$$

$$\Delta V = 0,1387$$

TABLA DE DATOS TECNICOS THW - 90 (mm <sup>2</sup> )								
CALIBRE CONDUCTOR	NUMERO HILOS	DIAMETRO HILO	DIAMETRO CONDUCTOR	ESPESOR AISLAMIENTO	DIAMETRO EXTERIOR	PESO	AMPERAJE (*)	
							AIRE	DUCTO
mm <sup>2</sup>		mm	mm	mm	mm	Kg/Km	A	A
2.5	7	0.66	1.92	0.8	3.5	32	37	27
4	7	0.84	2.44	0.8	4.1	47	45	34
6	7	1.02	2.98	0.8	4.6	67	61	44
10	7	1.33	3.99	1.1	6.2	117	88	62
16	7	1.69	4.67	1.5	7.7	186	124	85
25	7	2.13	5.88	1.5	8.9	278	158	107
35	7	2.51	6.92	1.5	10	375	197	135
50	19	1.77	8.15	2	12.3	520	245	160
70	19	2.13	9.78	2	13.9	724	307	203
95	19	2.51	11.55	2	15.7	981	375	242
120	37	2.02	13	2.4	18	1245	437	279
150	37	2.24	14.41	2.4	19.4	1508	501	318
185	37	2.51	16.16	2.4	21.1	1866	586	361
240	37	2.87	18.51	2.4	23.5	2416	654	406
300	37	3.22	20.73	2.8	26.5	3041	767	462
400	61	2.84	23.51	2.8	29.3	3846	908	541
500	61	3.21	26.57	2.8	32.3	4862	1037	603

Figura 108: Datos técnicos para el cable THW-90 mm<sup>2</sup>  
Fuente: Manual electrotécnico Shneider

$$I_d = 1,25 * I_n$$

$$I_d = 1,25 * 3,5 = 4,375 A$$

Se seleccionó un cable con un calibre de 2.5 mm<sup>2</sup>

- **Cálculo de dispositivos para el arranque directo de las bombas de engranajes**

POTENCIA	1 HP – 746 W
TENSIÓN	220 V
COS FI	0,8
RENDIMIENTO	0,88
TRIFÁSICO	1,732

Con los datos que tenemos de la bomba procederemos a calcular la intensidad nominal

$$IN = \frac{(1 * 746)}{(220 * 0.8 * 0.88 * 1,732)}$$

$$IN = 2,78 A$$

- Con la intensidad nominal podemos calcular la corriente de diseño.
- La corriente de diseño es la IN agregando el 25%

$$ID = 3,476 A$$

- El cálculo de interruptor termo magnético por motor es igual a la corriente de diseño.

$$ITM = ID$$

$$ITM = 3,476 A$$

Se seleccionó la curva c de acuerdo al tipo de cargas.

- Para el cálculo del contactor se usa la intensidad nominal.

$$KM = 2,781 A$$

- Para el cálculo del rele termico , se calcula en base de la intensidad nominal dimensionando un + - 25 % .

Rango mínimo:

$$RMI = \frac{2,78}{1,25} = 2,224 A$$

Rango máximo:

$$RMx = 2,78 * 1,25 = 3,475 A$$

- **Para el cálculo del conductor**

La caída de tensión no debe superar el 2.5%

La distancia es de 12 metros

La resistividad del cobre es de 0.0175

$$sección = \frac{(0,0175 * 1,732) * (12 * 3,476 * 0,8)}{5,5} = 0,18 mm^2$$

Se selecciona el conductor mínimo de 2,5 mm<sup>2</sup>

• **Cálculo de dispositivos para el arranque directo del motorreductor 1**

POTENCIA	0,4 HP – 298,4 W
TENSIÓN	220 V
COS FI	0,8
RENDIMIENTO	0,88
TRIFÁSICO	1,732

Con los datos que tenemos de la bomba procederemos a calcular la intensidad nominal

$$IN = \frac{(0,4 * 746)}{(220 * 0,8 * 0,88 * 1,732)}$$

$$IN = 1,11 A$$

- Con la intensidad nominal podemos calcular la corriente de diseño.
- La corriente de diseño es la IN agregando el 25%

$$ID = 1,390 A$$

- El cálculo de interruptor termo magnético por motor es igual a la corriente de diseño.

$$ITM = ID$$

$$ITM = 1,390 A$$

Se seleccionó la curva c de acuerdo al tipo de cargas

- Para el cálculo del contactor se usa la intensidad nominal

$$KM = 1,112 A$$

- Para el cálculo del relé termico , se calcula en base de la intensidad nominal dimensionando un + - 25 %

Rango mínimo:

$$RMi = \frac{1,11}{1,25} = 0,89 A$$

Rango máximo:

$$RMx = 1,11 * 1,25 = 1,39 A$$

- **Para el cálculo del conductor**

La caída de tensión no debe superar el 2.5%

La distancia es de 12 metros

La resistividad del cobre es de 0.0175

$$sección = \frac{(0,0175 * 1,732) * (12 * 1,390 * 0,8)}{5,5} = 0.0736mm^2$$

Se selecciona el conductor mínimo de 2,5 mm<sup>2</sup>.

- **Cálculo de dispositivos para el arranque directo del motorreductor 2**

POTENCIA	0,5 HP – 373 W
TENSIÓN	220 V
COS FI	0,8
RENDIMIENTO	0,88
TRIFÁSICO	1,732

Con los datos que tenemos de la bomba procederemos a calcular la intensidad nominal

$$IN = \frac{(0,5 * 746)}{(220 * 0,8 * 0,88 * 1,732)}$$

$$IN = 1,390 A$$

- Con la intensidad nominal podemos calcular la corriente de diseño.
- La corriente de diseño es la IN agregando el 25%

$$ID = 1,738 A$$

- El cálculo de interruptor termo magnético por motor es igual a la corriente de diseño

$$ITM = ID$$

$$ITM = 1,738 A$$

Se seleccionó la curva c de acuerdo al tipo de cargas

- Para el cálculo del contactor se usa la intensidad nominal

$$KM = 1,390 A$$

- Para el cálculo del réle térmico , se calcula en base de la intensidad nominal dimensionando un + - 25 %

Rango mínimo:

$$RMi = \frac{1,11}{1,25} = 1,112 A$$

Rango máximo:

$$RMx = 1,11 * 1,25 = 1,387 A$$

- **Para el cálculo del conductor**

La caída de tensión no debe superar el 2,5%

La distancia es de 12 metros

La resistividad del cobre es de 0,0175

$$sección = \frac{(0,0175 * 1,732) * (12 * 1,738 * 0,8)}{5,5} = 0,0920 \text{ mm}^2$$

Se seleccionó el conductor mínimo de 2,5mm.

Tabla N° 77: Análisis de cargas conectadas para la maquina purificadora

EQUIPOS				MOTORES					Corriente Nominal (A)	Factor de operación según tipo de carga (fn)	CARGA CONSUMIDA	
N°	Descripción	Tensión de operación (V)	fase	Tensión Nominal (V)	Potencia Nominal (HP)	Factor de potencia (fp)	Eficiencia (n)	Carga Nominal (kVA)			kW	kVAr
1	Bomba de engranaje 1	220	3	220	1	0,8	0,88	1,06	2,78	0,6	0,51	0,38
2	Bomba de engranaje 2	220	3	220	1	0,8	0,88	1,06	2,78	0,6	0,51	0,38
3	Bomba de engranaje 3	220	3	220	1	0,8	0,88	1,06	2,78	0,6	0,51	0,38
4	Bomba de engranaje 4	220	3	220	1	0,8	0,88	1,06	2,78	0,6	0,51	0,38
5	Bomba de engranaje 5	220	3	220	1	0,8	0,88	1,06	2,78	0,6	0,51	0,38
6	Motoreductor 1	220	3	220	0.4	0,8	0,88	0,37	0,97	0,6	0,18	0,13
7	motoreductor 2	220	3	220	0.5	0,8	0,88	0,52	1,36	0,6	0,25	0,19
<b>SUBTOTALES</b>											<b>2,97</b>	<b>2,23</b>
<b>KVA (TOTAL)</b>											<b>3,71</b>	
<b>DEMANDA MAXIMA DE 8 HORAS (Kva)</b>											<b>3,71</b>	
<b>FACTOR AJUSTADO (25% RESERVA)</b>											<b>1,25</b>	
<b>DEMANDA MAXIMA AJUSTADA (kVA)</b>											<b>4,64</b>	
<b>DEMANDA MAXIMA AJUSTADA (A)</b>											<b>12,19</b>	

Fuente: Elaboración propia

Diseño de la maquina se realizó en el programa Solidworks, los planos detallados se encuentran en anexos.

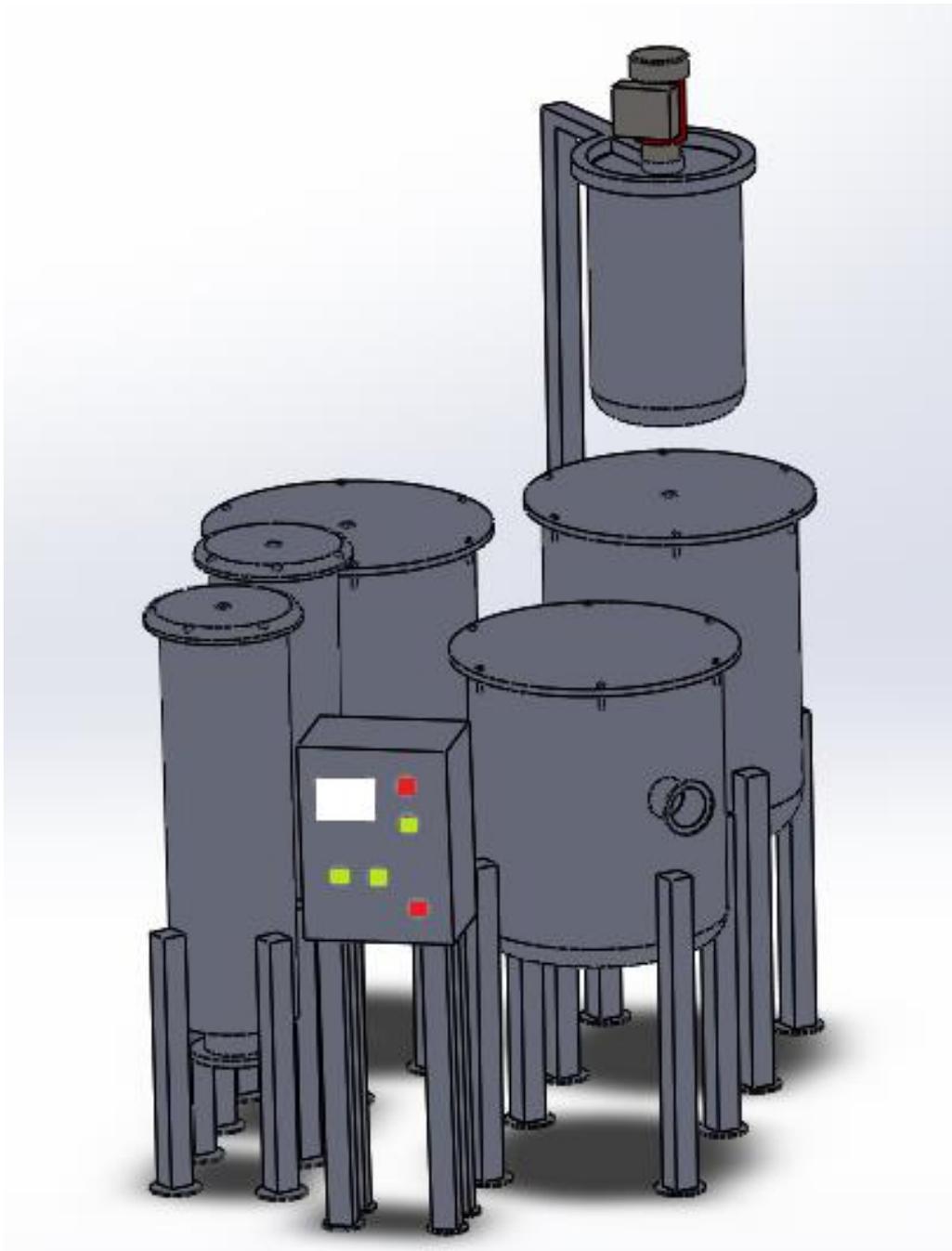


Figura 109: Diseño de la maquina en solidworks  
Fuente: Elaboración propia

## VII. VIABILIDAD DEL PROYECTO

### 7.1 Análisis de la inversión

La máquina para tratamiento y reutilización del aceite dieléctrico empleara algunos materiales que fueron cotizados en el mercado local y otros serán importados. La evaluación del presupuesto incluirá la mano de obra para el ensamble de la máquina.

Tabla N° 78: Presupuesto de materiales para la maquina

<b>Inventario de materiales de la máquina de tratamiento y reutilización del aceite dieléctrico</b>				
<b>N°</b>	<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>P. UNIT</b>	<b>TOTAL</b>
1	Plancha Acero inoxidable 304 2.00mm*1220mm*2440mm	1	S/. 485,5	S/. 486
2	Plancha Acero inoxidable 316 1.50mm*1500mm*3000mm	1	S/. 799,5	S/. 799
3	Tubo de acero inoxidable 304 / 40c/c 1/2"	12	S/. 4,2	S/. 168
4	Codos 90° de acero inoxidable 1/2 pulg	17	S/. 1	S/. 187
5	Universal de acero inoxidable 1/2 pulg	12	S/. 20	S/. 240
6	Unión T de acero inoxidable 1pulg	4	S/. 17	S/. 68
7	Válvula de bola de 1/2 pulg	10	S/. 30	S/. 300
8	Manómetro para baja presión	1	S/. 80	S/. 80
9	Termómetro	1	S/. 80	S/. 80
10	Malla inoxidable 304 8" MESH 30	1	S/. 331	S/. 331
11	Malla inoxidable 304 8" MESH 60	1	S/. 331	S/. 331
12	Arcilla absorbente	60	S/. 19,2	S/. 1152
13	Filtro de 10 micrones	2	S/. 480	S/. 480
14	Filtro de 20 micrones	1	S/. 480	S/. 480
15	Bomba de aceite	5	S/. 500	S/. 2500
16	Bomba de vacio	1	S/. 500	S/. 500
17	motoreductor R-O1	1	S/. 700	S/. 700
18	motoreductor R-C2	1	S/. 700	S/. 700
19	Filtro centrifuge	1	S/. 600	S/. 600
20	Resistencia	1	S/. 150	S/. 150
21	Tablero tibox 60*40*20	1	S/. 289	S/. 289
22	canaleta para tablero eléctrico 30*33	1	18	18
23	llave monofásica 220 V 25 A	1	45	45
24	llave termo magnética 220 v trifásica 25 A	1	95	95
25	llave termo magnética trifásica 220 v 10 A	7	95	665
26	Contactador trifásico 9 A LC1D09	7	105	735

27	Relés térmicos LR2K0307 (1.2 -1.8 A)	7	140	980
28	Cable vulcanizado 3*12	20	8	160
29	Pulsador rojo	7	10	70
30	Pulsador verde	7	10	70
31	Lámpara verde	7	10	70
21	TOTAL			S/. 13529

Fuente: Elaboración propia

La máquina será colocada sobre un remolque que se encuentra en el mercado local.



Figura 110: carreta de transporte  
Fuente: Mercado libre-Perú

A continuación, se muestra la inversión total del proyecto, se considera la mano de obra el 20% del costo de los materiales, este costo de mano de obra cubre los gastos que conlleva el ensamblaje.

Tabla N° 79: Presupuesto de materiales para la maquina

<b>INVERSIÓN TOTAL DE LA MAQUINA</b>		
$I_m$ = Inversión en la maquina	S/. 13529	S/. 13529
Inversión de mano de obra	$20 \% * (I_m)$	S/. 2162,3
Inversión en transporte	$2 \% * (I_m)$	S/. 216,23
Inversión de remolque tipo carreta	S/ 600	S/. 600
<b>TOTAL</b>		<b>S/. 17105,38</b>

Fuente: Elaboración propia

## 7.2 Análisis de la relación de costos

Para poder valorizar el aceite dieléctrico que contienen los transformadores de distribución aérea de media tensión, se cotizo en el mercado local el precio de 1 cilindro de 55 galones.

A continuación, se seleccionan las potencias de los transformadores que más abundan en la ciudad de Chiclayo con la finalidad de poder establecer una relación entre el costo de aceite y el costo del transformador de distribución, a continuación, se detallan unas tablas:

Tabla N°80: Costo del aceite dieléctrico en los transformadores

<b>COSTO DEL ACEITE DIELECTRICO CONTENIDO EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION AEREA DE MEDIA TENSION</b>		
<b>Capacidad del transformador</b>	<b>Contenido de Aceite dieléctrico</b>	<b>Costo de aceite</b>
15 Kva	65	S/. 1124,5
25 Kva	70	S/. 1211
37,5 Kva	75	S/. 1297,5
50 Kva	85	S/. 1470,5
75 Kva	90	S/. 1557
100 Kva	112	S/. 1937,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 81: Costo referencia de transformadores

<b>COSTO REFERENCIAL TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION AEREA DE MEDIA TENSION</b>		
<b>Capacidad del transformador</b>	<b>MARCA ABB Codigo</b>	<b>Costo del transformador</b>
15 Kva	UAC 00XX	S/. 14401,81
25 Kva	UAD 00XX	S/. 18291,06
37,5 Kva	UAE 00XX	S/. 23616,85
50 Kva	UAF 00XX	S/. 28403,11
75 Kva	UAG 00XX	S/. 37244,12
100 Kva	UAG 00XX	S/. 55061,85

Fuente: Elaboración propia

Con los costos que se detallan en la tabla y la tabla, se establece la siguiente relación.

Tabla N° 82: Costo del equipo vs costo del aceite

<b>COSTO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION VS. COSTO DEL ACEITE DIELECTRICO</b>			
<b>Capacidad del transformador</b>	<b>Costo de aceite</b>	<b>Costo del transformador</b>	<b>%</b>
15 Kva	S/. 1124,5	S/. 14401,81	7,8
25 Kva	S/. 1211	S/. 18291,06	6,6
37,5 Kva	S/. 1297,5	S/. 23616,85	5,5
50 Kva	S/. 1470,5	S/. 28403,11	5,2
75 Kva	S/. 1557	S/. 37244,12	4,2
100 Kva	S/. 1937,6	S/. 55061,85	3,5

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la relación costo del transformados vs costo del aceite dieléctrico se concluye que el % se va reduciendo mientras aumenta la capacidad del transformador, sin embargo, el costo del aceite dieléctrico es un valor considerable.

También se consideran los costos que se tienen por el cambio de aceite, estos costos incrementan al considerar el impacto en la confiabilidad del servicio eléctrico, debido a que para poder realizar el cambio de aceite al transformador se debe colocar fuera de operación al equipo, estos costos son altos, debido a que se pone en riesgo la distribución de energía a los usuarios.

El costo del mantenimiento para los transformadores de distribución está en función a un porcentaje del costo del equipo, a continuación, se detalla los costos.

Tabla N° 83: Costo del equipo vs costo del aceite

<b>COSTO DE MANTENIMIENTO PARA TRANSFORMADORES</b>			
<b>Capacidad del transformador</b>	<b>Costo del transformador</b>	<b>%</b>	<b>Costo de mantenimiento</b>
15 Kva	S/. 14401,81	9%	S/. 1296,2
25 Kva	S/. 18291,06	8%	S/. 1463,3
37,5 Kva	S/. 23616,85	7%	S/. 1653,2
50 Kva	S/. 28403,11	6%	S/. 1704,2
75 Kva	S/. 37244,12	5%	S/. 1862,2
100 Kva	S/. 55061,85	4%	S/. 2202,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 84: Relación del costo de mantenimiento con el costo del equipo

<b>RELACION ENTRE EL COSTO DEL CAMBIO DE ACEITE DIELECTRICO Y EL COSTO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION</b>				
<b>Capacidad del transformador</b>	<b>Costo de aceite</b>	<b>Costo de mantenimiento</b>	<b>Relación de Costos</b>	<b>Porcentaje</b>
15 Kva	S/. 1124,5	S/. 1296,2	S/. 14401,81	17%
25 Kva	S/. 1211	S/. 1463,3	S/. 18291,06	15%
37,5 Kva	S/. 1297,5	S/. 1653,2	S/. 23616,85	12%
50 Kva	S/. 1470,5	S/. 1704,2	S/. 28403,11	11%
75 Kva	S/. 1557	S/. 1862,2	S/. 37244,12	9%
100 Kva	S/. 1937,6	S/. 2202,5	S/. 55061,85	8%

Fuente: Elaboración propia

Una vez determinado los costos de mantenimiento se suman los costos de aceite y se relaciona con los costos de los transformados.

### 7.3 Análisis del servicio de regeneración de aceite dieléctrico sin PCB

Según [30] para tratar 19100 kg de aceite dieléctrico en una planta de tratamiento e costo total es de unos \$/. 26142,06, el referencial para tratar 100 kg de aceite es de unos 453 soles siempre y cuando estos aceites dieléctricos no contienen PCB.

Después del análisis de las relaciones de costo, se definió el precio de cada 100 kg de aceite dieléctrico se cobra 700 soles. a cobrar por el servicio de regeneración del aceite dieléctrico sin PCB de PCB:

Conociendo que la compra de 100 kg de aceite dieléctrico tiene un precio de S/. 1730, se tiene una nueva relación  $R_c$  entre el costo del servicio y el costo por la compra de nuevo.

$$R_c = \frac{700}{1730} = 40\%$$

Esta relación logra demostrar que el precio del tratamiento sigue siendo más barato que la compra de aceite dieléctrico nuevo. Cabe recalcar que esta relación de costo es referencial debido a que no solo se trata de regenerar el aceite, sino que también aumenta la vida útil del transformador. Debido a esto también se debe analizar el costo del servicio vs el costo del transformador de distribución aérea.

$$R_{ct} = \frac{700}{28403,11} = 0,025 = 2,5 \%$$

Con esta nueva relación se puede observar que no solo es el ahorro económico que se obtiene al regenerar el aceite, sino que permite el aumento de la vida del equipo

#### 7.4 Análisis del servicio de regeneración de aceite dieléctrico con PCB

En la tabla, se muestra la cantidad de reactivos que se emplea para la decloración de 100 kg de aceite dieléctrico según la concentración de PCB.

Tabla N° 85: Cantidad de reactivos según ppm de PCB

<b>Reactivos para la decloración de 100 kg</b>			
<b>Concentración inicial de PCB 8000 ppm</b>			
	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
Hidróxido De Sodio 98%	4 kg	S/. 26	S/. 104
Polietilenglicol 400	18 L	S/. 46	S/. 828
<b>TOTAL</b>			<b>S/. 932</b>
<b>Concentración inicial de PCB 4000 ppm</b>			
	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
Hidróxido De Sodio 98%	2 kg	S/. 26	S/. 52
Polietilenglicol 400	9 L	S/. 46	S/. 414
<b>TOTAL</b>			<b>S/. 466</b>
<b>Concentración inicial de PCB 2000 ppm</b>			
	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
Hidróxido De Sodio 98%	1 kg	S/. 26	S/. 26
Polietilenglicol 400	5 L	S/. 46	S/. 230
<b>TOTAL</b>			<b>S/. 256</b>
<b>Concentración inicial de PCB 1000 ppm</b>			
	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
Hidróxido De Sodio 98%	0,5 kg	S/. 26	S/. 13
Polietilenglicol 400	2,5 L	S/. 46	S/. 115
<b>TOTAL</b>			<b>S/. 128</b>
<b>Concentración inicial de PCB 500 ppm</b>			
	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
Hidróxido De Sodio 98%	0,22 kg	S/. 26	S/. 5,72
Polietilenglicol 400	1,1 L	S/. 46	S/. 50,6
<b>TOTAL</b>			<b>S/. 56,32</b>

Fuente: Elaboración propia

## VIII.- RESULTADOS

- Para eliminar el PCB se seleccionó el método KPEG.
- Para el reacondicionamiento del aceite dieléctrico se seleccionó la deshidratación por termo vacío.
- Para la recuperación del aceite dieléctrico se seleccionó la percolación tipo torre, la arcilla a usarse es la bauxita porocel.
- Para la agitación del reactor 1 uno se necesita una potencia de 0,196 KW y una velocidad necesaria para la agitación: 153rpm.
- Para la agitación del reactor 1 uno se necesita una potencia de 0,35 KW y una velocidad necesaria para la agitación: 83 rpm.
- Para poder calentar el aceite dieléctrico se necesita 9,01 kW.
- El flujo volumétrico de aceite que pasa por el filtro de tierra fuller es de  $0,0714 \frac{\text{litros}}{\text{cm}^2 * \text{min}}$
- Para una masa de agua de 100 gramos, la bomba de vacío necesita poder extraer 1,0079 m<sup>3</sup>/h a una temperatura de 70 °C y a una presión de 0,31202 bar

## IX. CONCLUSIONES

- Del objetivo 1 se concluye:

En la ciudad de Chiclayo hay un aproximado de 28,950 kg de aceite en transformadores de distribución aérea de media tensión, no existe un registro actualizado sobre transformadores contaminados con PCB, se trabajó con un registro que se realizó a 130 transformadores de distribución aéreo de media tensión de los cuales solo 10 dieron positivos para bifenilos policlorados, la mayoría adquiridos en el año 2000 de la marca MAGNETRON.

Cabe resaltar la importancia que tiene tratar estos aceites dieléctricos que están contaminados con PCB, desde un punto de vista económico y ambiental. Un aceite dieléctrico deteriorado representa pérdidas y limitación en la operación de los transformadores.

- Del segundo objetivo se concluye:

Se escogió el proceso KPEG como método de decloración debido a que esta tecnología permite cumplir con el objetivo principal del proyecto, es la más segura en cuanto al tema ambiental, debido a que no genera emisiones. Es económica en comparación a otras tecnologías que emplean reactivos costosos y atmosferas inertes y lo más importante es que la decloración permite que el aceite pueda ser regenerado y reutilizado debido a que los reactivos que se emplean no afectan en nada la naturaleza del aislante.

- Del tercer objetivo de concluye:

Como método para el reacondicionamiento del aceite dieléctrico se seleccionó la deshidratación por termo vacío, debido a que, a comparación de los otros métodos, este es más defectivo para la eliminación de la humedad.

Para la recuperación y la eliminación de sólidos suspendidos en el aceite dieléctrico se seleccionó el método de retrofilling a través de filtros de 10micras y 20 micras y para filtración por tierra fuller se seleccionó la bauxita porocel la cual puede ser reutilizada de 20 a 25 veces sin problemas, este tipo de arcilla logra perder la eficiencia de forma lenta.

- Del cuarto objetivo se concluye:

La máquina fue diseñada bajo los parámetros de limpieza de los aceites dieléctricos, cumple con el propósito de reacondicionamiento y recuperación de bajos volúmenes aceite (PCB), el diseño esta formulado para que la maquina tenga un fácil mantenimiento, permitiendo cambiar los cartuchos de los filtros y la arcilla absorbente cuando estos se saturan.

- Del quinto objetivo se concluye:

Desde el punto de vista técnico y económico es viable el diseño de la máquina.

En el análisis de la viabilidad que se realizó se logró establecer que el costo del servicio de la recuperación del aceite dieléctrico corresponde al 40% del costo de la compra del aceite nuevo.

## **X.- RECOMENDACIONES**

- Antes de empezar a trabajar se recomienda verificar que el transformador se encuentre aislado y desenergizado.
- Se recomienda llevar un estricto control de la presión la temperatura y del nivel del aceite, para evitar perjudicar la naturaleza del aceite.
- Se recomienda llevar un control del sistema de filtración, para los cambios de cartuchos periódicamente.
- Se recomienda la automatización de la máquina, para poder mantener un control estricto sobre los parámetros de operación.
- Se recomienda implementar un plan para el manejo de aceites dieléctrico contaminado con PCB.
- La eficiencia de la maquina va a depender del mantenimiento que se le dé y de su correcta operación.
- Se recomienda un correcto diagnóstico del transformador mediante el análisis del aceite dieléctrico, verificar el contenido de PCB y un análisis físico-químico del aislante antes y después del proceso.
- Se recomienda seguir el procedimiento de manejo de PCB durante el mantenimiento de equipos
- Se recomienda realizar un manual de operación y mantenimiento para evitar problemas con la máquina.

## XI. ANEXOS

- Especificaciones técnicas para transformadores de media tensión.

# DIMENSIONES, PESOS Y PERDIDAS

## 1 TRANSFORMADORES DE NIVEL DE TENSIÓN 15.5KV

POTENCIA (KVA)	DIMENSIONES PRINCIPALES					PESOS			PERDIDAS		
	LONGITUD A (mm)	ANCHO B (mm)	ALTURA C (mm)	D.BUSHING M.T (mm)	D.BUSHING B.T (mm)	PESO ACT. (Kg)	PESO ACBT (Kg)	PESO TOTAL (Kg)	P. FIERRO (watts)	P. COBRE 75 °C(watts)	P. TOTALES (watts)
15	650	350	1150	260	80	85	70	180	110	475	585
25	650	400	1100	260	80	110	65	205	120	690	810
37,5	650	550	1100	260	80	140	65	255	170	890	1060
50	700	550	1050	280	90	165	70	280	205	1115	1320
75	900	650	1100	280	90	210	85	360	310	1590	1900
100	900	650	1100	280	90	265	85	420	380	1740	2120
125	1000	700	1150	280	110	320	115	510	450	2020	2470
160	1000	700	1150	280	110	360	105	550	550	2400	2950
200	1150	750	1200	280	110	445	145	690	655	2940	3595
250	1150	800	1250	280	110	530	165	810	775	3360	4135
320	1350	800	1350	280	150	630	205	990	930	4015	4945
400	1350	800	1350	280	150	740	230	1120	1065	4815	5880
500	1450	850	1400	280	150	820	280	1360	1400	5860	7260
630	1500	850	1550	300	180	1090	320	1610	1630	6470	8100
800	1600	900	1600	300	180	1250	390	1900	1835	8230	10065
1000	1700	950	1650	300	180	1470	480	2230	2180	9795	11975
1250	1700	950	1750	300	180	1770	540	2610	2690	11080	13770
1600	2000	1150	1750	300	180	2050	700	3150	3080	13690	16770
2000	2100	1200	1800	300	210	2630	820	3950	4040	14790	18830
2500	2200	1300	1900	300	210	3100	920	4700	4780	17650	22430

- Especificaciones técnicas para transformadores de media tensión

## 2 TRANSFORMADORES DE NIVEL DE TENSIÓN 24KV

POTENCIA (KVA)	DIMENSIONES PRINCIPALES					PESOS			PERDIDAS		
	LONGITUD A (mm)	ANCHO B (mm)	ALTURA C (mm)	D.BUSHING M.T (mm)	D.BUSHING B.T (mm)	PESO ACT. (Kg)	PESO ACEIT. (Kg)	PESO TOTAL (Kg)	P. FIERRO (watts)	P. COBRE 75 °C(watts)	P. TOTALES (watts)
15	650	500	1050	280	80	95	60	170	115	450	565
25	650	550	1100	280	80	115	70	220	130	710	840
37,5	700	600	1100	280	80	150	80	280	180	960	1140
50	700	650	1100	300	90	180	90	310	230	1190	1420
75	850	650	1100	300	90	230	100	390	335	1560	1895
100	950	700	1100	300	90	270	120	470	400	1790	2190
125	1050	750	1150	300	110	340	140	550	485	2130	2615
160	1050	750	1200	300	110	390	160	640	590	2600	3190
200	1100	750	1250	300	110	450	170	730	700	3020	3720
250	1200	800	1300	300	110	550	210	910	820	3590	4410
320	1250	850	1400	300	150	670	260	1080	1020	4270	5290
400	1200	900	1500	300	150	810	280	1250	1170	5050	6220
500	1400	1000	1500	300	150	950	370	1550	1540	5810	7350
630	1500	900	1150	320	180	1100	400	1750	1690	6950	8640
800	1600	900	1700	320	180	1300	480	2050	1950	8350	10300
1000	1650	950	1750	320	180	1540	540	2450	2330	9740	12070
1250	1800	1000	1800	320	180	1800	660	2850	2750	11460	14210
1600	1950	1150	1800	320	180	2200	800	3550	3390	13510	16900
2000	2100	1250	1900	320	210	2720	1050	4450	4400	16120	20520
2500	2200	1300	2000	320	210	3200	1100	5050	5090	18120	23210

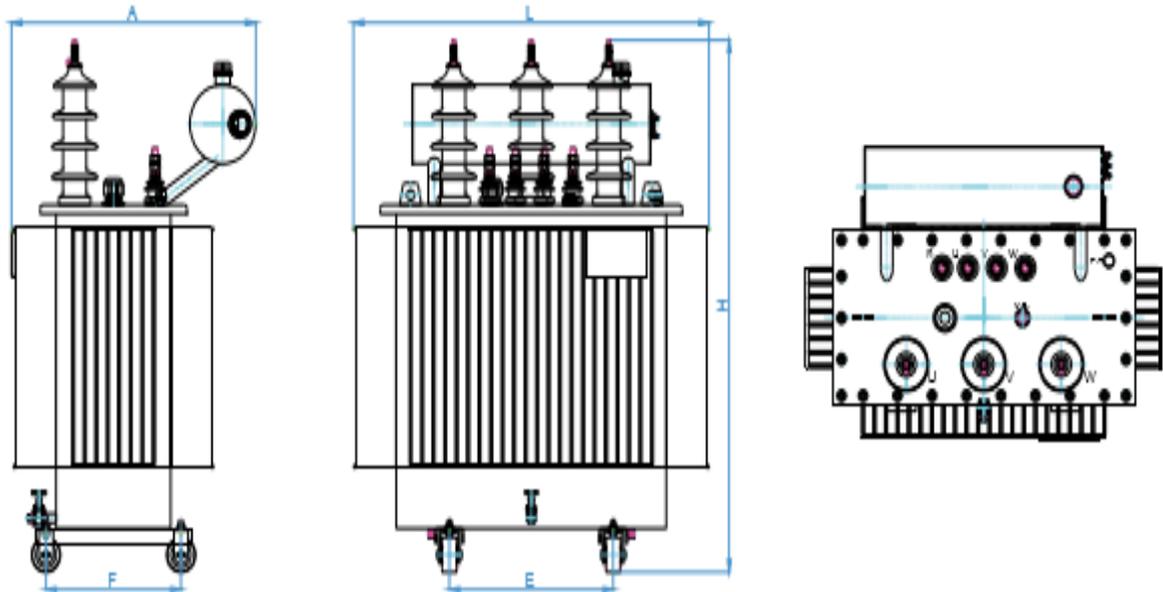
- Especificaciones técnicas para transformadores de media tensión

### ③ TRANSFORMADORES DE NIVEL DE TENSIÓN 36 KV

POTENCIA (KVA)	DIMENSIONES PRINCIPALES					PESOS			PERDIDAS		
	LONGITUD A (mm)	ANCHO B (mm)	ALTURA C (mm)	D.BUSHING M.T (mm)	D.BUSHING B.T (mm)	PESO ACT. (Kg)	PESO ACERT. (Kg)	PESO TOTAL (Kg)	P. FIERRO (watts)	P. COBRE 75 °C(watts)	P. TOTALES (watts)
50	800	700	1250	300	90	210	115	400	255	1130	1385
75	900	750	1250	300	90	260	125	480	405	1495	1900
100	900	750	1350	300	90	300	145	560	460	1730	2190
125	900	800	1350	320	110	370	165	640	540	2140	2680
160	950	800	1400	320	110	420	185	730	635	2505	3140
200	1000	850	1400	320	110	480	195	820	750	3040	3790
250	1200	850	1450	320	110	580	235	1000	900	3430	4330
320	1300	900	1500	320	150	700	285	1170	1080	4190	5270
400	1250	900	1600	320	150	840	305	1340	1280	4940	6220
500	1400	1000	1600	320	150	980	395	1640	1640	5260	6900
630	1650	900	1700	320	180	1130	425	1840	1825	6620	8445
800	1750	950	1800	320	180	1330	505	2140	2070	8130	10200
1000	1850	1000	1900	320	180	1570	565	2540	2480	9160	11640
1250	1900	1050	2000	340	180	1830	685	2940	3000	10915	13915
1600	2100	1100	1900	340	180	2230	825	3640	3520	13160	16680
2000	2200	1300	2000	340	210	2750	1075	4540	4480	15020	19500
2500	2300	1200	2100	340	210	3230	1125	5540	5320	17880	23200

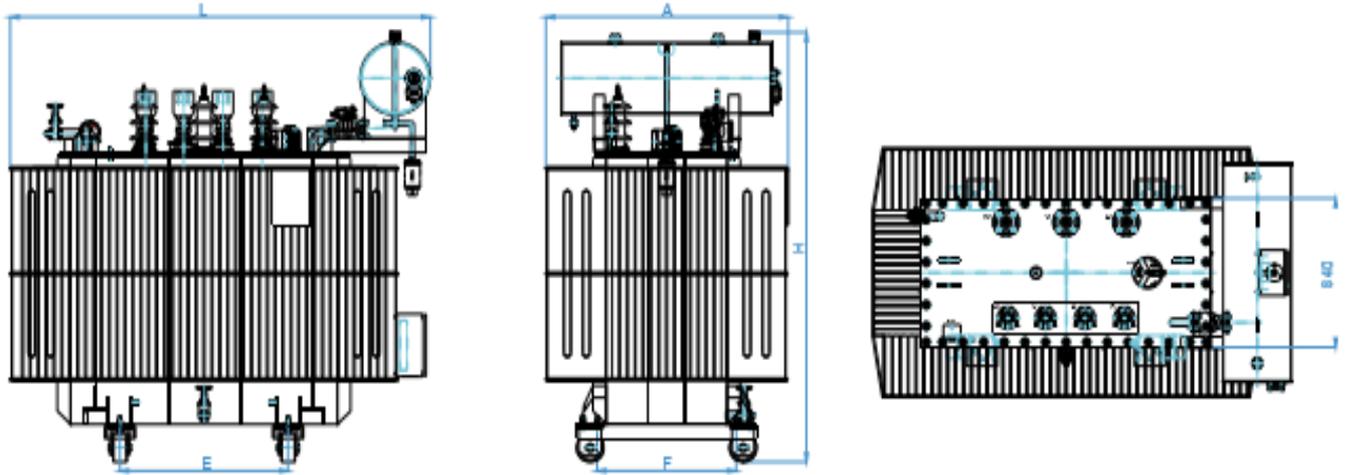
- Especificaciones técnicas para transformadores de media tensión

## Características y dimensiones de los Transformadores de Distribución:



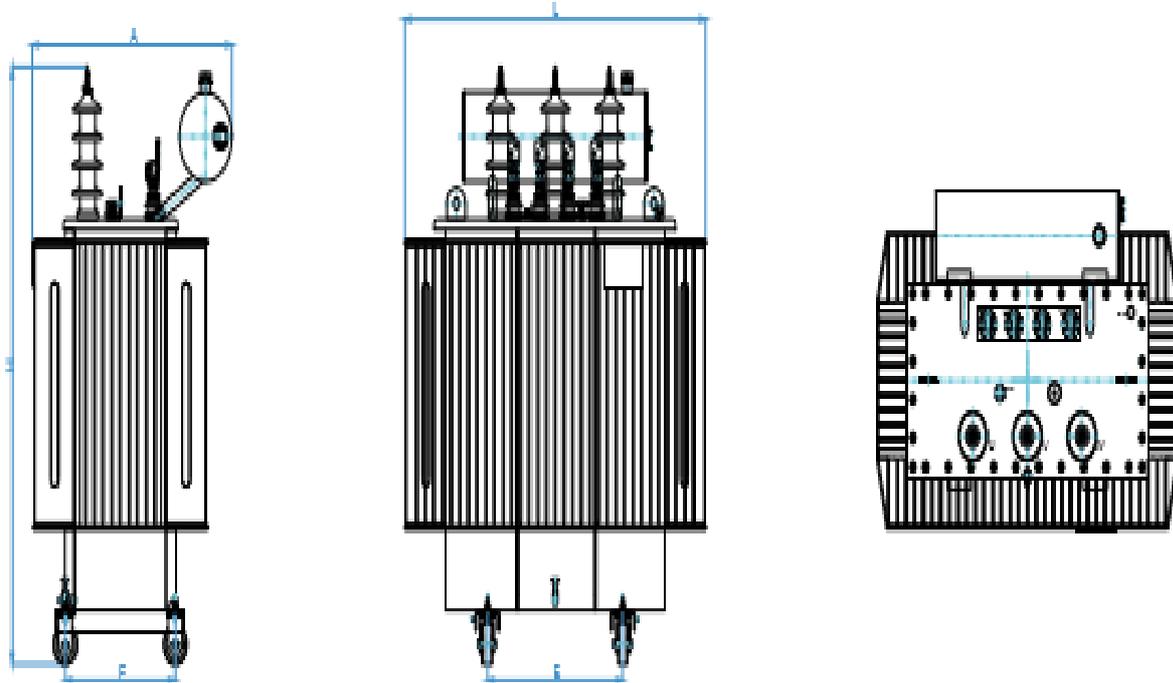
ITEM	CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR	DIMENSIONES APROXIMADAS (mm)					PESOS APROX. (KGR)	
		L	A	H	E	F	ACBITOTAL	
1	TD30 50 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	78	613	999	410	350	90	353
2	TD30 50 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	846	618	1196	450	385	119	423
3	TD30 100 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	836	677	1091	450	375	112	498
4	TD30 100 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	933	717	1274	500	435	167	615
5	TD30 160 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1082	719	1211	490	400	156	687
6	TD30 160 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1092	749	1341	540	455	208	806
7	TD30 200 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1127	749	1229	520	415	194	828
8	TD30 200 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1125	768	1397	550	460	236	911
9	TD30 250 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1182	784	1398	530	420	223	982
10	TD30 250 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1237	849	1540	570	470	335	1158

- Especificaciones técnicas para transformadores de media tensión



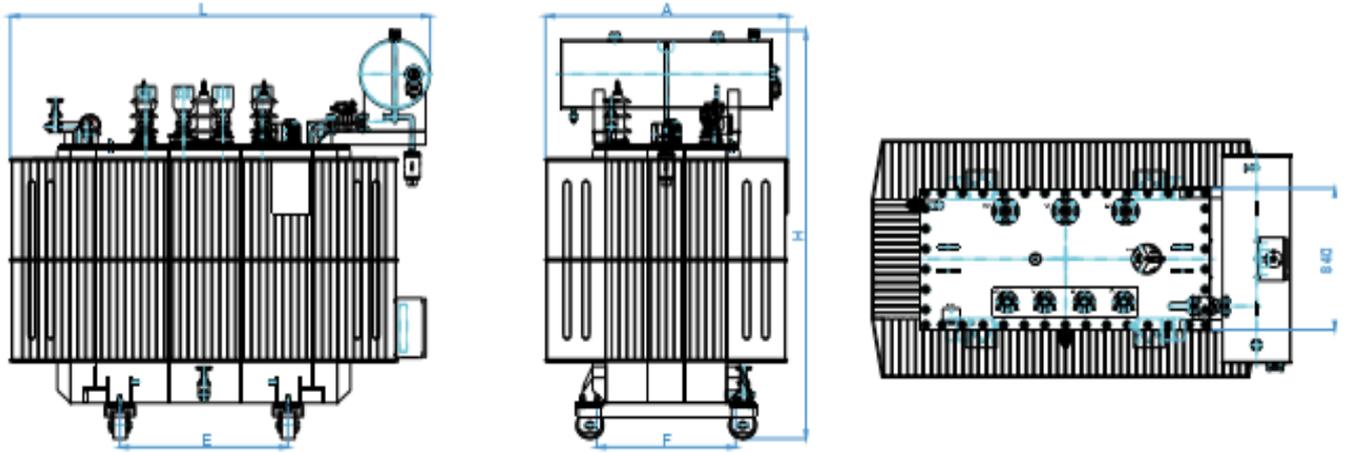
ITEM	CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR	DIMENSIONES APROXIMADAS (mm)					PESOS APROX. (KGR)	
		L	A	H	E	F	ACEITE	TOTAL
17	TD30 800 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1938	1108	1946	730	600	652	2731
18	TD30 800 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1978	1078	1986	770	610	707	2897
19	TP30 1000 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2050	1179	2135	810	795	896	3438
20	TP30 1000 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2052	1132	2226	840	800	961	3586
21	TP30 1250 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2157	1241	2242	850	815	1024	4049
22	TP30 1250 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2187	1241	2272	860	815	1055	4163
23	TP30 1500 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2315	1306	2308	910	865	1204	4714
24	TP30 1500 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2295	1305	2348	940	875	1300	4772
25	TP30 2000 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2452	1412	2426	980	970	1484	5853
26	TP30 2000 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2547	1392	2481	1040	990	1536	6149
27	TP30 2500 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2535	1488	2467	990	970	1567	6502
28	TP30 2500 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2635	1508	2599	1090	1030	1873	7177
29	TP30 3000 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2822	1687	2614	1110	1065	2011	8063
30	TP30 3000 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2901	1660	2684	1180	1100	2292	8592

- Especificaciones técnicas para transformadores de media tensión



ITEM	CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR	DIMENSIONES APROXIMADAS (mm)					PESOS APROX. (KGR)	
		L	A	H	E	F	ACEITE	TOTAL
11	TD30 400 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1365	928	1523	600	500	357	1438
12	TD30 400 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1330	898	1658	610	495	369	1476
13	TD30 500 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1485	993	1656	630	535	419	1753
14	TD30 500 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1465	983	1756	660	560	451	1815
15	TD30 630 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1565	1051	1803	680	570	541	2144
16	TD30 630 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1600	1061	1870	720	585	584	2323

• Especificaciones técnicas para transformadores de media tensión



ITEM	CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR	DIMENSIONES APROXIMADAS (mm)					PESOS APROX. (KGR)	
		L	A	H	E	F	ACEITE	TOTAL
17	TD30 800 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1938	1108	1946	730	600	652	2731
18	TD30 800 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	1978	1078	1986	770	610	707	2897
19	TP30 1000 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2050	1179	2135	810	795	896	3438
20	TP30 1000 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2052	1132	2226	840	800	961	3586
21	TP30 1250 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2157	1241	2242	850	815	1024	4049
22	TP30 1250 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2187	1241	2272	860	815	1055	4163
23	TP30 1500 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2315	1306	2308	910	865	1204	4714
24	TP30 1500 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2295	1305	2348	940	875	1300	4772
25	TP30 2000 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2452	1412	2426	980	970	1484	5853
26	TP30 2000 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2547	1392	2481	1040	990	1536	6149
27	TP30 2500 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2535	1488	2467	990	970	1567	6502
28	TP30 2500 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2635	1508	2599	1090	1030	1873	7177
29	TP30 3000 KVA 10000/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2822	1687	2614	1110	1065	2011	8063
30	TP30 3000 KVA 22900/400 V Dyn5 1000 m.s.n.m. 60 Hz	2901	1660	2684	1180	1100	2292	8592

- Análisis físico químico del aceite dieléctrico



Cr. Villaviciosa de Odón a Móstoles (M-856) Km. 1,5  
Móstoles - 28935 (Madrid)  
Teléfono: 916 189 710 Fax: 916 182 372  
comercial@ceis.es



Las actividades marcadas (\*) no están  
amparadas por la acreditación de ENAC

## ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE ACEITE AISLANTE

### INFORME DE RESULTADOS

Datos del solicitante:

Referencia Informe CEIS:

Referencia Cliente:

Fecha toma de muestra:  
Fecha recepción muestra:

Fecha inicio trabajos:  
Fecha finalización trabajos:

*Naturaleza de la muestra: Aceite aislante dieléctrico*

*Empresa donde presta servicio (1):*

**Centro:**

**Nº serie/Identificador:**

**Puesta en servicio:**

**Motivo del análisis:**

**Tipo Comunicación:**

**Tensión Máxima (KV):**

**Potencia (MVA):**

**Peso aceite (Kg):**

**U. Técnica:**

**Tipo:**

Transformador de Gran Potencia (Potencia igual o superior a 100 MVA))

**O.Trab/Serv.:**

**Fabricante:**

**Respiración:**

**Refrigeración:**

**Año de fabricación:**

**Regulación:**

**Temperatura (°C):**

CEIS no es responsable de la toma de muestras

Este informe sólo puede ser reproducido en su totalidad, quedando prohibida la reproducción parcial del mismo sin autorización expresa del laboratorio.

Las opiniones e interpretaciones indicadas en este informe no deben de ser utilizadas desde un punto de vista contractual sin un acuerdo explícito entre ambas partes.

(1) Información facilitada por el cliente

Este informe es seguro y está protegido frente a cambios posteriores a su firma. Para verificar la versión firmada y su coincidencia, deberá pinchar sobre el icono de alerta que aparece sobre la firma electrónica, y podrá así visualizar la única versión que la firma incluida en el informe avala.

Gestor del Cliente  
04/11/2014

Referencia Informe CEIS:

Referencia Cliente:

Centro:	Peso aceite (Kg):
Puesta en servicio:	Temperatura (°C):
Tensión Máxima (kV):	Regulación:
Potencia (MVA):	U.Técnica:

### RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

Analisis	Norma	Valor	Incert.	Límite
Aspecto Visual *	UNE 21320-3:89	Limpio		LIMPIO
Índice de Color *	UNE 21320-3:89	3		< 4
Contenido en agua, valoración Karl-Fischer (ppm)	UNE-EN 60814:1999	25,4 (20)**	2,0	< 10
Tensión de ruptura dieléctrica (KV/2,5mm)	UNE-EN 60156:97	75	4,0	> 50
Índice de neutralización (mg KOH/g)	PT-QUI-25 Ed 02	0,133	0,008	< 0,15
Tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas (Tag DELTA) 90°C	UNE 60247:04	0,0366	0,0005	< 0,20

Categoría: O - Transformadores de Potencia / Reactancias con tensión nominal igual o superior a 400 kV

Las incertidumbres estimadas se refieren a la incertidumbres expandidas de la medida de un nivel de confianza al 95% excepto para el contenido en gases que es relativa al valor medido.

Los valores límites están basados en la norma IEC 60422:2005 y pueden estar sujetos a modificaciones según criterios del laboratorio.

La medida obtenida en el ensayo del Contenido en Agua sólo es cuantificable para valores superiores a 2 ppm.

\*\*Contenido de agua disuelta corregido a un valor equivalente a 20 °C.

El ensayo de Tensión de ruptura dieléctrica se realiza con electrodos tipo VDE y agitación. Temperatura del líquido 24°C

Valores de 6 medidas de tensión de ruptura (KV/2,5 mm): 75,00; 75,00; 75,00; 75,00; 75,00; 75,00.

El esfuerzo eléctrico en el ensayo de tangente delta es de 50,00 kV. La frecuencia es de 50,00 Hz.

### RECUENTO DE PARTÍCULAS Y DISTRIBUCIÓN POR TAMAÑOS (\*)

Los valores se expresan por cada 100 ml

	Rdo. Ensayo	Estimación al 50%***	Estimación al 90%***
Entre 2,5 y 5 micras	100.000	150.000	700.000
Entre 5 y 15 micras	35.000	65.000	800.000
Entre 15 y 25 micras	5.000	6.000	90.000
Entre 25 y 50 micras	1.000	2.000	20.000
Entre 50 y 100 micras	90	200	1.000
Mayores de 100 micras	1	30	100
Mayores de 2,5 micras	100.000	223.230	1.611.100
Mayores de 5 micras	80.000	73.230	911.100
Mayores de 15 micras	1.000	8.230	111.100

\*\*\* Estos valores se indican a modo de referencia y son fruto de estudios propiedad del laboratorio.

- **Catálogo SEW de moto reductor para R-O1**

Se seleccionó el reductor DE SERIE R..DRE/DRS de código R07 con una entrada de 1400 y una salida de 155 rpm.



**R..DRE/DRS**  
R.. → DRE/DRS

R07, $n_e = 1400$ 1/min					50 Nm
$n_s$ [1/min]	$M_{smax}$ [Nm]	$F_{Ra}$ [N]	$\varphi_{(R)}$ [°]	$i$	DT56 DR63 DRS71S
 3					
18	50	1510	-	78.24	
20	50	1510	-	71.47	
23	50	1510	-	60.32	
27	50	1510	-	51.52	
29	50	1470	-	47.78	
32	50	1420	-	44.16	
34	50	1380	-	41.31	
35	50	1370	-	40.34	
36	50	1340	-	38.51	
41	50	1270	-	34.05	
48	50	1190	-	29.08	
52	50	1150	-	26.97	
60	50	1080	-	23.32	
64	50	1040	-	21.73	
 2					
76	50	960	-	18.31	
84	50	920	-	16.73	
99	50	850	-	14.12	
116	50	790	-	12.06	
125	50	760	-	11.18	
145	50	710	-	9.67	
155	50	685	-	9.01	
178	49	645	-	7.85	
187	43	595	-	7.48	
205	43	535	-	6.83	

- **Catálogo SEW de moto reductor para R-O1**

Se selección un motor DRS 71S 4 de 0,25 kW del catálogo de SEW

De 4 polos por que los rpm que necesitamos son bajos, y de categoría IE1

porque es de eficiencia estándar

## 2 Global Motor, 50/60 Hz, 4-Pole

4-pole DRS motors for 50/60 Hz, IE1\*

Motor type DRS	P <sub>N</sub> kW	M <sub>N</sub> Nm	n <sub>N</sub> rpm	I <sub>N</sub> A	cosφ	IE class	η <sub>50%</sub> %	η <sub>75%</sub> %	η <sub>100%</sub> %	I <sub>A</sub> /I <sub>N</sub>	M <sub>A</sub> /M <sub>N</sub>	M <sub>H</sub> /M <sub>N</sub>
DRS 71S 4	0.18	1.25 1.01	1380 1700	0.64 0.45	0.70 0.69	IE1*	- -	- -	- -	3.5 4.2	1.8 1.9	1.8 1.9
DRS 71S 4	0.25	1.72 1.4	1390 1700	0.67 0.62	0.75 0.69	IE1*	68.6 -	72.6 -	72.6 -	4.1 4.2	1.9 1.9	1.9 1.9
DRS 71S 4	0.37	2.55 2.1	1380 1700	1.14 1.06	0.70 0.65	IE1*	59.1 -	65.3 67.7	66.6 68.0	3.5 4.4	1.8 2.1	1.8 2.1
DRS 71M 4	0.55	3.8 3.1	1380 1700	1.55 1.31	0.72 0.68	IE1*	69.1 -	71.9 76.1	70.6 74.0	3.6 4.5	2.1 2.4	2.1 2.3

4-pole DRS motors for 50/60 Hz, IE1\*

Motor type DRS	P <sub>N</sub> kW	M <sub>N</sub> Nm	n <sub>N</sub> rpm	m kg	J <sub>Mot</sub> 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	BE..	Z <sub>0</sub> BG BGE 1/h	M <sub>B</sub> Nm	m <sub>B</sub> kg	J <sub>Mot_BE</sub> 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	Global	CEL	ENCE
DRS 71S 4	0.18	1.25 1.01	1380 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	2.5	10.2	6.2		-	-
DRS 71S 4	0.25	1.72 1.4	1390 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	3.5	10.2	6.2		-	-
DRS 71S 4	0.37	2.55 2.1	1380 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	5	10.2	6.2		-	-
DRS 71M 4	0.55	3.8 3.1	1380 1700	9.1	7.1	BE1	4100 11000	10	11.7	8.4		-	-

- **Catálogo de SEW para moto reductor de R—C2**

Se selección el reductor R17 del catalogo SEW con una entrada de 1400 rpm y una salida de 88 rpm

R17, $n_e = 1400$ 1/min					85 Nm	
$n_a$ [1/min]	$M_{amax}$ [Nm]	$F_{Ra}$ [N]	$\Psi_{(R)}$ [°]	$i$	DR63 DRS71S DRS71M	DRS80
 3						
17	85	1770	-	81.64		
20	85	1770	-	70.39		
21	85	1770	-	65.61		
24	85	1770	-	57.35		
26	85	1770	-	53.76		
30	85	1770	-	47.44		
32	85	1770	-	44.18		
36	85	1770	-	38.61		
39	85	1770	-	36.20		
44	85	1770	-	31.94		
49	85	1770	-	28.32		
58	85	1650	-	24.07		
 2						
55	85	1680	-	25.23		
60	85	1620	-	23.15		
71	85	1500	-	19.71		
82	85	1400	-	16.99		
88	85	1350	-	15.84		
101	85	1270	-	13.84		
108	85	1230	-	12.98		

- **Catálogo SEW de moto reductor para R- C2**

Se selección un motor DRS 71S 4 de 0.37 kW del catalogo de SEW Se selección un motor DRS 71S 4 de 0,25 kW

De 4 polos por que los rpm que necesitamos son bajos, y de categoría IE1

## 2 Global Motor, 50/60 Hz, 4-Pole

4-pole DRS motors for 50/60 Hz, IE1\*

Motor type DRS	P <sub>N</sub> kW	M <sub>N</sub> Nm	n <sub>N</sub> rpm	I <sub>N</sub> A	cosφ	IE class	η <sub>50%</sub> %	η <sub>75%</sub> %	η <sub>100%</sub> %	I <sub>Δ</sub> /I <sub>N</sub>	M <sub>Δ</sub> /M <sub>N</sub>	M <sub>H</sub> /M <sub>N</sub>
DRS 71S 4	0.18	1.25 1.01	1380 1700	0.64 0.45	0.70 0.69	IE1*	- -	- -	- -	3.5 4.2	1.8 1.9	1.8 1.9
DRS 71S 4	0.25	1.72 1.4	1390 1700	0.67 0.62	0.75 0.69	IE1*	68.6 -	72.6 -	72.6 -	4.1 4.2	1.9 1.9	1.9 1.9
DRS 71S 4	0.37	2.55 2.1	1380 1700	1.14 1.06	0.70 0.65	IE1*	69.1 -	65.3 67.7	66.6 68.0	3.5 4.4	1.8 2.1	1.8 2.1
DRS 71M 4	0.55	3.8 3.1	1380 1700	1.55 1.31	0.72 0.68	IE1*	69.1 -	71.9 76.1	70.6 74.0	3.6 4.5	2.1 2.4	2.1 2.3

4-pole DRS motors for 50/60 Hz, IE1\*

Motor type DRS	P <sub>N</sub> kW	M <sub>N</sub> Nm	n <sub>N</sub> rpm	m kg	J <sub>Mot</sub> 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	BE..	Z <sub>0</sub> BG BGE 1/h	M <sub>B</sub> Nm	m <sub>B</sub> kg	J <sub>Mot_BE</sub> 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	Global	CEL	ENCE
DRS 71S 4	0.18	1.25 1.01	1380 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	2.5	10.2	6.2		-	-
DRS 71S 4	0.25	1.72 1.4	1390 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	3.5	10.2	6.2		-	-
DRS 71S 4	0.37	2.55 2.1	1380 1700	7.8	4.9	BE05	6000 9500	5	10.2	6.2		-	-
DRS 71M 4	0.55	3.8 3.1	1380 1700	9.1	7.1	BE1	4100 11000	10	11.7	8.4		-	-

- Cantidad de reactivos según el porcentaje de PCB [14]

**Tabla 6.** Cantidad de KOH a utilizar según concentración de PCB's y volumen de aceite  
**Table 6.** Amount of KOH suggested, according to the concentration of PCB's and oil volume

Volumen de aceite (litros)	Concentración inicial de PCB's (ppm)						
	100	250	500	1000	2000	4000	8000
	Cantidad de KOH requerida (Kg)						
100	0.044	0.109	0.218	0.435	0.870	1.740	3.480
250	0.109	0.272	0.544	1.088	2.175	4.350	8.700
500	0.218	0.544	1.088	2.175	4.350	8.700	17.400
1000	0.435	1.088	2.175	4.350	8.700	17.400	34.800
2000	0.870	2.175	4.350	8.700	17.400	34.800	69.600

**Tabla 7.** Cantidad de PEG a utilizar según concentración de PCB's y volumen de aceite  
**Table 7.** Amount of PEG suggested, according to the concentration of PCB's and oil volume

Volumen de aceite (litros)	Concentración inicial de PCB's (ppm)						
	100	250	500	1000	2000	4000	8000
	Cantidad de PEG requerida (litros)						
100	0.218	0.544	1.088	2.175	4.350	8.700	17.400
250	0.544	1.359	2.719	5.438	10.875	21.750	43.500
500	1.088	2.719	5.438	10.875	21.750	43.500	87.000
1000	2.175	5.438	10.875	21.750	43.500	87.000	174.000
2000	4.350	10.875	21.750	43.500	87.000	174.000	348.000

- Catálogo para resistencia de inmersión tipo rosca



## CRN TECNOPART, S.A.

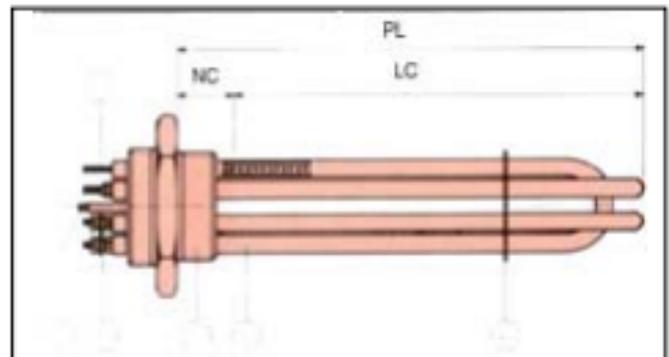
Sant Roc 30  
08340 VILASSAR DE MAR (Barcelona)  
Tel 902 404 748 - 937 591 484 Fax 937 591 547  
e-mail: [crn@crntp.com](mailto:crn@crntp.com) [http:// www.crntecnopart.com](http://www.crntecnopart.com)

## CETAL

CT- 030.05

## CALENTADORES DE INMERSION ROSCADOS 230 / 400 V

- Formados por 2 o 3 horquillas en cruz soldadas sobre un tapón de latón
  - (Standar), o de acero o inoxidable.(bajo demanda)
  - Circuitos a 230V (se incluyen los puentes de conexión)
  - Funda para termostato, opcional.
  - Accesorios; ver pág. 5 y 11.
  - Presión de trabajo: Máximo 15 bar
- NC (Longitud zona fría) Racor M 45 o 1 1/2" NC = 40 mm  
Racor M77 o 2 1/2" NC = 70 mm
- LC (PL-NC) (Longitud calentada o útil). Siempre debe estar sumergida.



Carga 2 W/cm² Inox AISI 321									
W	Racor M 77 x 200			Racor M 45 x 200			Racor 1 1/2" G		
	PL mm.	Peso Kg.	Referencia	PL mm.	Peso Kg.	Referencia	PL mm.	Peso Kg.	Referencia
500				250	0,80	45-V8-005*			
750				250	0,75	45-V8-007	250	0,75	49-V8-007
1000				320	0,85	45-V8-010	320	0,85	49-V8-010
1500				470	1,05	45-V8-015	470	1,05	49-V8-015
2000	350	2,25	77-V8-020	600	1,35	45-V8-020	600	1,35	49-V8-020
3000	510	2,45	77-V8-030	920	1,75	45-V8-030	920	1,75	49-V8-030
4000	670	4,50	77-V16-040	* 230 V Monofásico					
6000	980	6,10	77-V16-060						
8000	1280	7,65	77-V16-080						
10000	1720	10,00	77-V16-100						
12000	1830	10,60	77-V16-120						

### DATOS DE UTILIDAD

Carga 2 W/cm², para aire, aceite y fuel pesado.

Carga 4 W/cm², para agua y aceites térmicos.

Carga 8-12 W/cm², para agua.

Para temperaturas superiores a 110 °C, utilizar los modelos con caña de bombes separada.

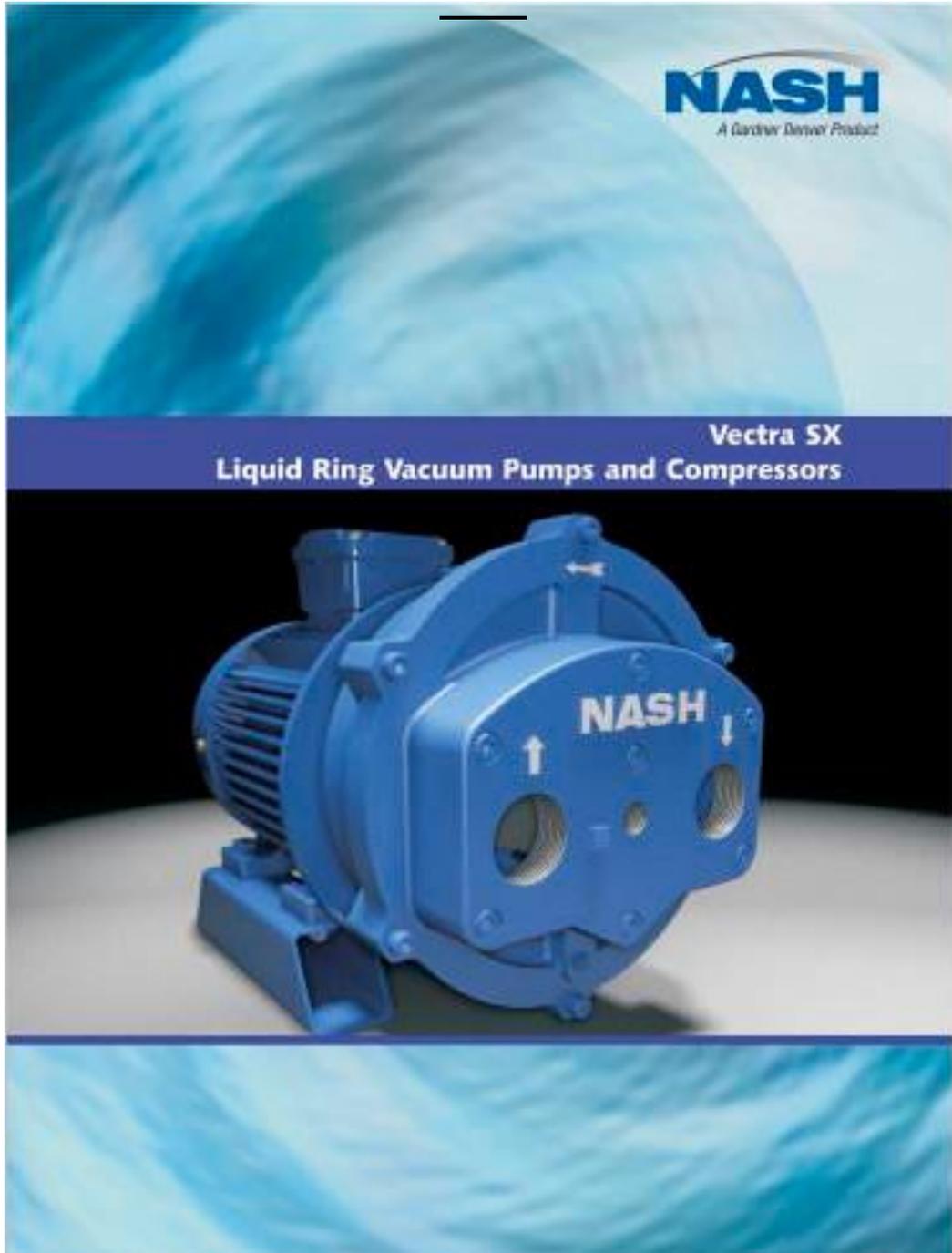
Carga 4 W/cm² Inox AISI 316 Ti									
W	Racor M 77 x 200			Racor M 45 x 200			Racor 1 1/2" G		
	PL mm.	Peso Kg.	Referencia	PL mm.	Peso Kg.	Referencia	PL mm.	Peso Kg.	Referencia
1000				180	0,85	45-C8-010	180	0,85	49-C8-010
1500				250	0,75	45-C8-015	250	0,75	49-C8-015
2000				300	0,85	45-C8-020	300	0,85	49-C8-020
3000	310	3,15	77-C16-030	440	1,00	45-C8-030	440	1,00	49-C8-030
4000				600	1,35	45-C8-040	600	1,35	49-C8-040
4500	435	3,55	77-C16-045	660	1,45	45-C8-045	660	1,45	49-C8-045
6000	540	4,00	77-C16-060	850	1,75	45-C8-060	850	1,75	49-C8-060
9000	810	5,25	77-C16-090						
12000	1055	6,95	77-C16-120						

Los modelos con racor





- Bomba de vacío de anillo líquido NASH serie Vectra SX



### A Higher Standard in Liquid Ring Pumps

NASH liquid ring pumps produced by Gardner Denver have been setting the standard in performance and reliability for over 100 years. That standard has been redefined with the Vectra SX line of small industrial vacuum pumps.

The Vectra SX series has taken the legendary NASH standard for quality and applied it to smaller equipment sizes. These pumps have been created to excel in a wide range of demanding industrial applications. Gardner Denver Nash has employed advanced design techniques such as solid modeling, finite element analysis and computational fluid dynamics, along with decades of experience, to develop a product line that delivers superior value to our customers. The result is industry leading performance, lower operating costs, and application specific configurations that target the varied requirements of demanding industrial processes.

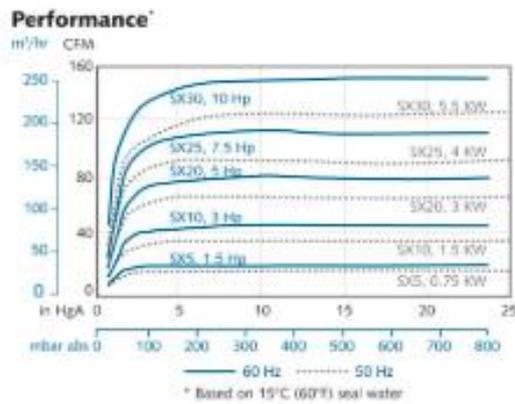
### Reliable Technology for Demanding Industrial Processes

Vectra SX vacuum pumps and compressors provide lower life cycle costs and greater overall value to our customers. Operating speeds have been carefully selected to ensure minimal wear, high efficiency and a long operating lifespan. Utility costs are kept to a minimum due to low water flow requirements and low power consumption. The Vectra SX has been designed so that the motor does not operate in the service factor, further extending pump life. It includes high quality components such as a precision cast 316 stainless steel rotor that is standard on all units. The cast iron pump includes a **patented stainless steel liner** to reduce internal corrosion and maintain peak operating performance. A **patented gas scavenging feature** has also been employed to provide superior performance and longevity at high vacuum levels.

Basic Specifications	
Vacuum range	to 33 mbar abs. 0-29 in Hg vac
Mechanical seal	Single
Compressor pressure	to 2.3 bar abs. standard 0 - 20 psig
Construction material	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cast Iron with precision cast 316SS Rotor &amp; SS lined body</li> <li>All precision cast 316 SS</li> </ul>



Monoblock



### Application Specific Variations

Variation	Applications
High Vacuum	Central vacuum systems Deaeration/Degassification Distillation Drying Evaporation Impregnation Autoclaves/Sterilization Vapor recovery Vent gas removal Laboratory vacuum Priming
Water Handling	Extrusion Evisceration Filling Filtration Vacuum conveyance Dairy Soil remediation
Compressor	Wastewater treatment Digester gas Aeration Gas boosting



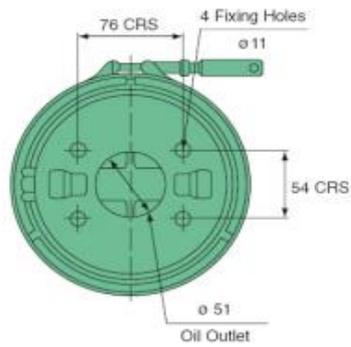
### Dimensions - Monoblock

Inches (mm in blue)

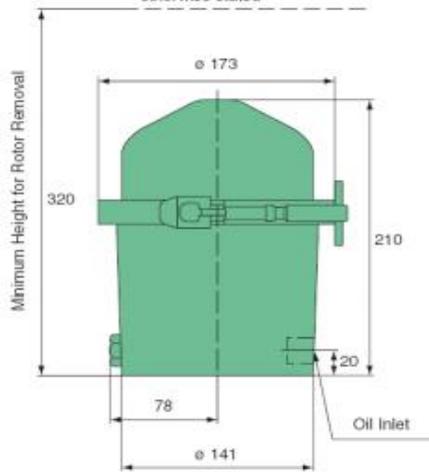
Model	Length A	Width B	Height C
SX5	15 381	8 200	9 232
SX10	20 495	11 267	12 306
SX20	22 556	11 267	12 313
SX25	25 639	13 324	14 364
SX30	27 696	13 324	14 364

• **Filtro centrifugo**

**Datos técnicos**  
**Centrífuga FM090**



All measurements are in mm unless otherwise stated



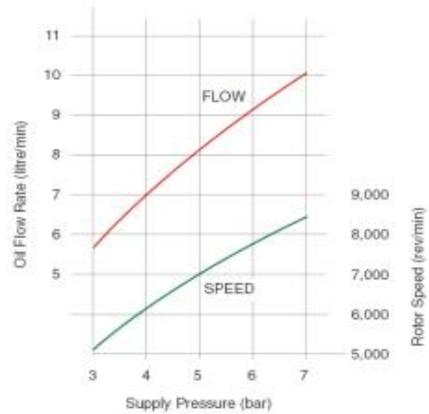
Part No.	Type	Oil Inlet Thread	C.O.V. Rating, bar
68 991 42 101	FM090-31	3/8" B.S.P.	1,3



- Apto para flujos de 15 a 90 litros
- Capacidad de almacenamiento de contaminantes 0.9 litros
- Capacidad de aceite en el rotor 1.125 litros
- Diámetro interno mínimo de la manguera de entrada del aceite 9.5 mm
- Diámetro mínimo de la manguera de salida del aceite 38 mm
- Este modelo está disponible con un rotor lavable es entregado una pieza inserta de papel 68 933 30 101 para facilitar la limpieza del rotor
- El peso neto de la centrífuga FM090 es 3.5 kg

**Performance Curves**

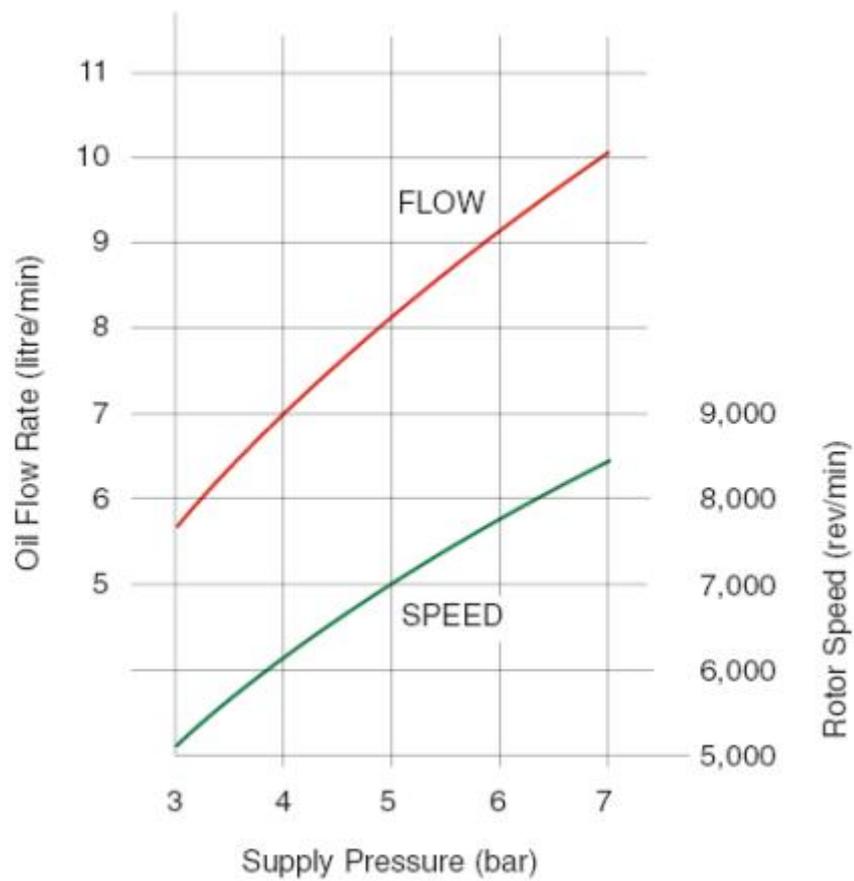
Typical Rotor Performance for SAE 30 Oil @ 100 °C



- Curva de operación de la centrifuga

### Performance Curves

Typical Rotor Performance for SAE 30 Oil @ 100 °C



## Instalación

### Como instalar una centrifuga FM 090-LCB

#### Ubicación y montaje

La centrifuga debe instalarse verticalmente **SOBRE EL NIVEL DEL ACEITE EN EL CARTER** en un lugar rígido del chasis y los más cercano posible al motor y a una válvula auxiliar de aire para minimizar el largo de mangueras.

**Suministro de aire** (Conexión 1/4" NPT) El suministro de aire debe extraerse de la válvula protectora auxiliar de aire a través de una manguera de nylon con diámetro externo de 6 mm

#### Nota:

- La presión del aire a la entrada de la centrifuga no debe exceder 125 psi.

#### Presión aire auxiliar

El equipo auxiliar no debe conectarse al sistema de frenos de aire excepto a través de dispositivo que proteja el sistema de frenos de servicio y de frenos secundarios a una presión no menor del 70 % de la presión nominal correspondiente a una desaceleración de 0.6 g.

**Suministro de aceite** (Conexión 1/2" NPT)

El suministro de aceite debe obtenerse de un punto del motor apropiado para obtener la máxima presión hacia la centrifuga.

Usualmente esto proviene del cabezal del filtro de flujo total usando una manguera del tipo Aeroquip FC300-8.

**Drenaje del aceite** (Conexión 1/2" NPT)

El aceite drena desde la base de montaje de la centrifuga a través de una manguera Aeroquip FC300-8 a un punto apropiado en el bloque del motor o al cárter. Esta manguera de retorno entra sobre o bajo del nivel de aceite en el cárter pero no debe presentar una ascensión de más de medio metro en dirección a la entrada al motor.

#### Nota:

- La centrifuga debe ser montada sobre el nivel de aceite en el cárter.

#### General

Todas las conexiones de mangueras deben efectuarse con fittings de alta presión tipo Aeroquip. Asegúrese que la centrifuga está fijada firmemente al chasis y que todas las mangueras están fijadas en posición

y no se rocen con partes en movimiento. Una vez completada la instalación arranque el motor y compruebe que no existan fugas de aire o aceite. Verifique la presión de aceite del motor. Apague el motor y se escuchará el sonido descendente del rotor indicando de esta manera que el aceite llega a la centrifuga y que esta funciona correctamente.

#### Operación Simple

La centrifuga FM090-LCB consiste de dos partes principales: la centrifuga y el mecanismo de control.

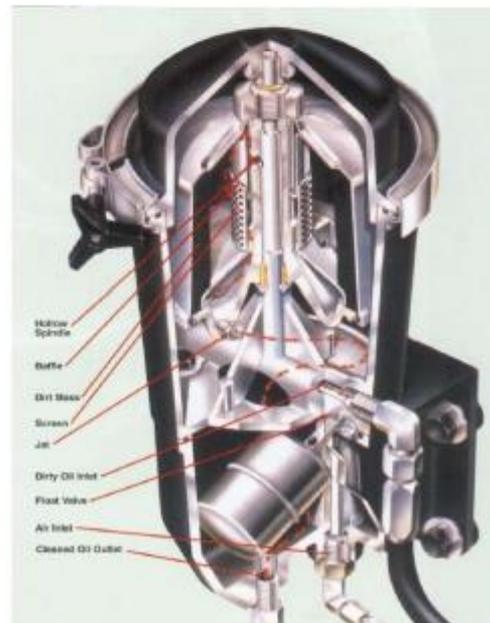
#### Centrifuga

**Rotor** – En la parte superior se encuentra el rotor con su tapa removible. El aceite sucio del motor entra lateralmente a la carcasa y sube por un tubo al rotor donde es uniformemente distribuido. El rotor es acelerado a una alta velocidad. La fuerza centrifuga resultante deposita las partículas contaminantes a la pared del rotor formando una masa compacta fácil de remover.

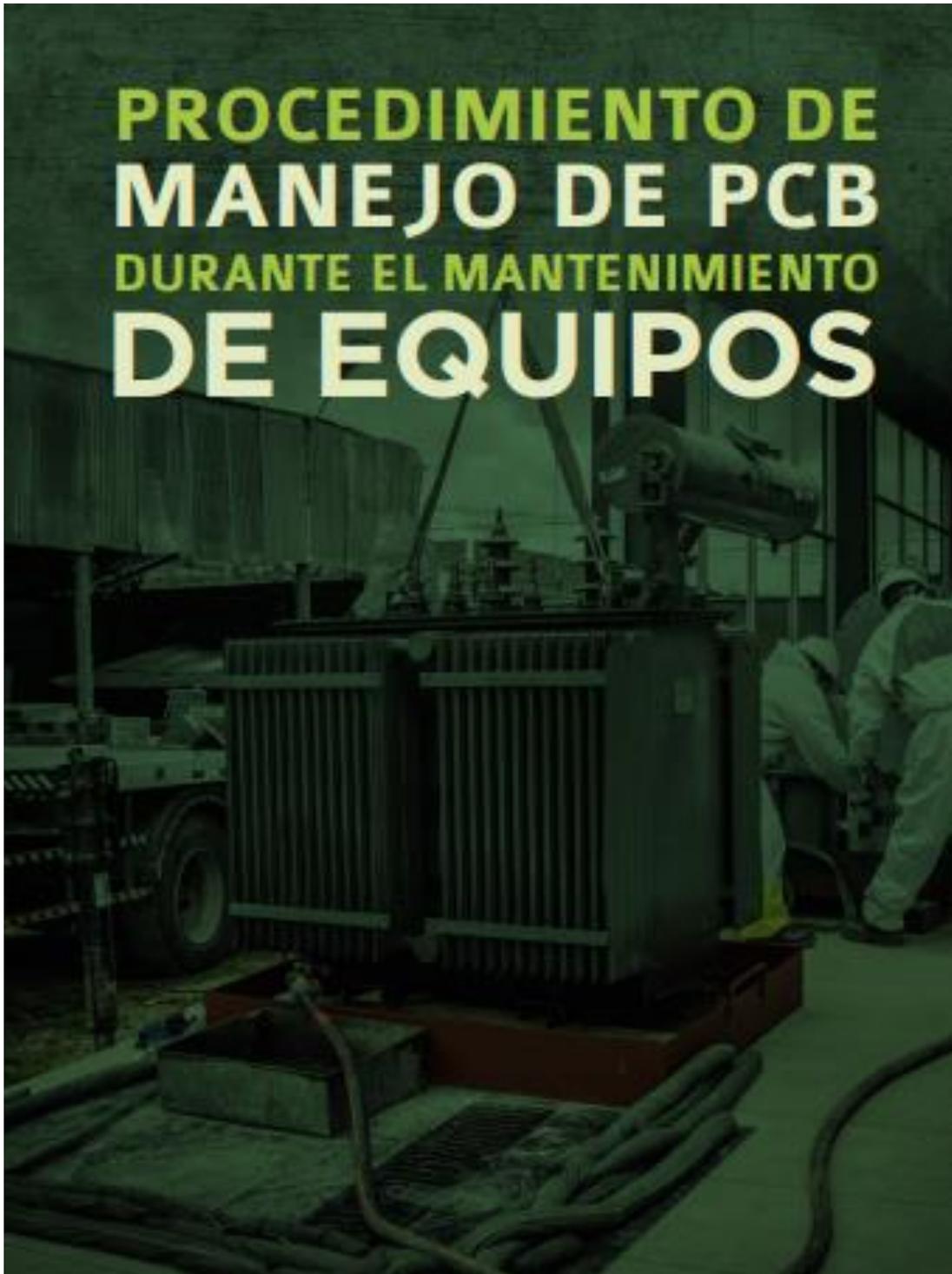
**Camera de impulsión**– El aceite limpio sale del rotor a través de perforaciones y entra en la camera de impulsión. El aceite se expela a través de toberas gemelas las cuales hacen girar el rotor con hasta 9.000 RPM.

#### Mecanismo de control

**LCB** – La centrifuga FM090-LCB puede montarse en casi cualquier lugar y usa mangueras y fittings comunes a otros filtros de flujo parcial. Un simple mecanismo de control en la base mantiene el nivel de aceite óptimamente para alcanzar la máxima velocidad del rotor y remoción de contaminantes. Este control opera con aire proveniente del sistema de aire comprimido del vehículo. El consumo de aire es tan pequeño (0,01 ltr/s) que apenas puede medirse. Cuando el nivel de aceite sube la válvula flotante deja pasar una pequeña cantidad de aire para controlar dicho nivel. Cuando el nivel de aceite baja se corta el aire para prevenir la entrada de burbujas al drenaje. El aceite limpio retorna desde la centrifuga al cárter.



- Procedimiento de manejo de PCB durante el mantenimiento de equipos



363.738

**P45 Perú. Ministerio del Ambiente**

Procedimiento de manejo de PCB durante el mantenimiento de equipos / Ministerio del Ambiente, Dirección General de Calidad Ambiental – Lima: MINAM, 2016.  
46 p. : il. Col., gráf., tabs.

1. CONTAMINANTES ORGANICOS PERSISTENTES 2. BIFENILOS POLICLORADOS  
3. IMPACTO AMBIENTAL. I. Perú. Ministerio del Ambiente. Dirección General de Calidad Ambiental II. Título

## Procedimiento de manejo de PCB durante el mantenimiento de equipos

© MINISTERIO DEL AMBIENTE. Dirección General de Calidad Ambiental.  
Av. Javier Prado Oeste 1440, San Isidro, Lima, Perú  
Teléfono: (511) 611-6000  
[www.minam.gob.pe](http://www.minam.gob.pe)

Centro Regional de Basilea para América del Sur  
Proyecto CRBAS-FMAM/PNUMA  
"Mejores Prácticas para el Manejo de PCB en el Sector Minero Sudamericano"  
Buenos Aires, Argentina  
[www.inti.gob.ar/basilea](http://www.inti.gob.ar/basilea)

**Elaborado por:**  
Mario Cesar Mendoza Zagarra

**Revisado por:**  
Vilma Morales Quillama  
Coordinadora Nacional del Proyecto PCB

**Primera edición, mayo 2016**  
Tiraje: 200 ejemplares  
Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2016-05102

**Diseño, diagramación e impresión:**  
Agencia MAS IDEAS S.A.C.  
Jr. Condorcanqui 560 - Rmac  
[vega\\_angel@live.com](mailto:vega_angel@live.com)  
Abril 2016

- Especificaciones tecnicas de la bauxita porocel (alumina activa)



**CERTIFICATE OF ANALYSIS**

PRODUCT NAME: **ACTIVATED ALUMINA**  
 PRODUCT DATE: NOV, 2015      LOT.No. 151116  
 TEST DATE: NOV, 2015      MINIMUM SCHELF LIFE: NOV. 2019

**ACTIVATED ALUMINA DESSICANTS**

**Product**

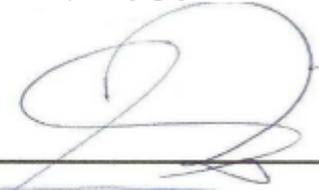
The product is a white, spherical porous material with the property of non-toxic, odorless, insoluble in water and ethanol. The particle size is uniform, the surface is smooth, the mechanical is strength ,the ability of moisture absorption is strong and the ball is not split after absorbing water.

**Technical data:**

Item	Unit	Technical specification			
Particel size	mm	1-3	3-5	4-6	5-8
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≥95	≥95	≥95	≥95
SiO <sub>2</sub>	%	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.03
Na <sub>2</sub> O	%	≤0.46	≤0.46	≤0.46	≤0.46
loss on ignition	%	≤6.2	≤6.2	≤6.2	≤6.2
Bulk density	g/ml	0.68-0.75	0.68-0.75	0.68-0.75	0.68-0.75
Surface area	m <sup>2</sup> /g	≥300	≥300	≥300	≥300
Pore volume	ml/g	0.38-0.45	0.38-0.45	0.38-0.45	0.38-0.45
Static adsorption capacity	%	≥20	≥20±1	≥20	≥20
Water absorption	%	≥55	≥55	≥55	≥55
Crystalline phase		x-p AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Crushing strength	N/particle	≥60	≥130	≥160	≥200

**Application:**

This product is used for deep drying of gas or liquid phase of petrochemicals and adsorption drying by automatic instruments.

  
 \_\_\_\_\_  
 Laboratory QC Manager

- Cotización de los filtros de 10 y 20 micras



TALLER DE MECANICA CHAGUI

**Oferta / Factura Proforma**

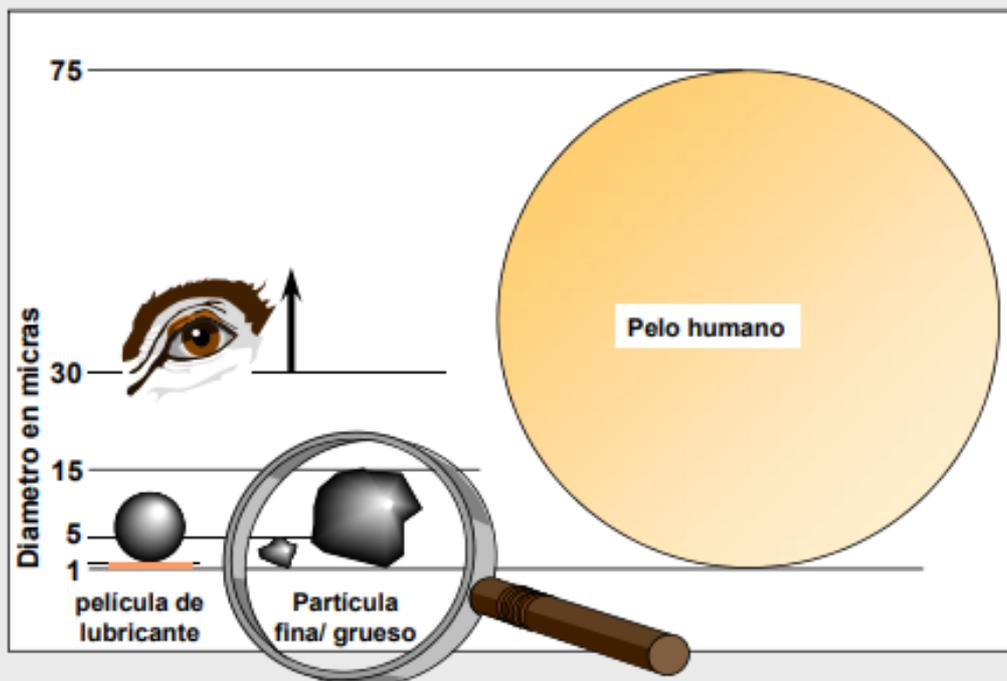
Perú

Nº de Oferta	VES 1/23650
Fecha	25/06/2019
Nº Cliente	647
NIF/CIF	
S/Consulta	Chagui
Plazo Entrega	6 Semana(s)
S/Contacto	Luis Gonzalez

Artículo	Descripción	Cantidad	Precio	% Dto.	Total
1.12.2	Filtro simple 1.12.2 Filtro simple 1.12.2 Plano: Z107393 Cuerpo: fundición nodular GGG 40 Juntas: viton Elemento filtrante tipo cesta 10micras con DDA: 4.36.1 0- 0,8bar	1	480,00		480,00
1.12.2	Filtro simple 1.12.2 Filtro simple 1.12.2 Plano: Z107393 Cuerpo: fundición nodular GGG 40 Juntas: viton Elemento filtrante tipo cesta 20 micras con DDA: 4.36.1 0- 0,8bar	1	480,00		480,00
350	Precio adicional para embalaje apto para transporte aéreo	1	50,00		50,00
TEX	Declaration: El exportador de los productos incluidos en el presente documento DE2925230 declara que, salvo indicación en sentido contrario, estos productos gozan de un origen preferencial europeo.	1	0,00		0,00

- Tamaño de partículas

## Tamaño de Partículas





- **Cotizacion de la bauxita porocel ( alumina activa)**

## RE: Silica Gel | Contacto General Luis Elmer Gonzales Arrasco

Estimad@ LUIS ELMER GONZALES, gusto en saludarle y gracias por contactarse con nosotros!

Nos es muy grato el cotizarle el siguiente producto:

Producto	Cantidad	Formato	Monto Total Neto
ALUMINA ACTIVADA (de 1/8 = 3-5 mm)	250	1KG	\$ 1.450.000 + IVA

Para completar el pedido, por favor enviar Orden de Compra y/o realizar pago vía métodos aceptados (ver más abajo). Asimismo, le solicitamos pueda confirmar con su ejecutivo la disponibilidad del producto y las formas de despacho, para regiones utilizamos Pullman Cargo.

Para proceso de entrega más expedita, agradecemos enviar sus datos de facturación.

### Datos de transferencia bancaria:

<b>Razón Social:</b>	OREGON CHEM GROUP SPA
<b>Rut:</b>	76.744.415-K
<b>Banco:</b>	Banco de Chile
<b>Cuenta Corriente:</b>	8820440404
<b>E-mail:</b>	contacto@quimicaindustrial.cl

- Cotización de materiales para conexión de la maquina

**P.I. S.R.L. PRODUCTOS INDUSTRIALES S.R.L.**  
 H.U.C. N° 20270453670 CEL: 978033854  
 IMPORTADOR DE FAJAS 979693867  
**ROLLUNDS** 979739422

CTA. SOLES BCP. 305-0067840-0-59  
 AV. LEONARDO ORTIZ 428 Telefono: (074) 231869  
 AV. LEGUIA 97B Telefono: (074) 254176

**PROFORMA**  
 N° 100000

Señor: *Mi Gaitero de Ayataca* Fecha: *20/06/19*

Dirección: *JAMBAYEQUE*

CANT.	UNID.	DESCRIPCION	P. UNIT	TOTAL
17	Pza	CORDOS 1/2 INOX	11.00	187.00
12	Pza	UNIVERSAL 1/2 INOX	20.00	240.00
6	Pza	"T" 1/2 INOX	17.00	102.00
12	Pza	VALVULAS GLOBOS 1/2 INOX	30.00	360.00
2	Pza	MANOMETROS 0-40 BAR	80.00	160.00
2	Pza	TERMOMETRO 0-100 °C	140.00	280.00
				<b>1329.00</b>

- Cotización de materiales para conexión de la maquina



COTIZACIÓN : E82-1906106

\* PLANCHAS  
\* TUBOS  
\* BARRAS  
\* ANGULOS  
\* PLATINAS  
\* ACCESORIOS  
\* SERVICIO DE  
CORTE Y DOBLEZ

Señores : MI CAUTIVO DE AYABACA SOCIEDAD ANONIMA CERRADA

Código : M01766

Atención : SRTA. GEIBY TOCTO OCUPA

Vendedor : Brenda Carrasco

Dirección : CAR.PANAMERICANA NORTE NRO. 777 - LAMBAYEQUE

Teléfono : 998345130

Curva de operación de la centrifuga

Fax :

Fecha : 20/06/2019

Referencia :

Estimados Señores:

En atención a su amable solicitud de cotización, les presentamos nuestra siguiente oferta:

Item	Código	Descripción	Equiva.	Und	Cantidad	Precio	Total US\$
1	30400200	PL. A. INOX. C-304 2.00mmx1220mmx2440mm 2B		PL	1.000	146.68	146.68
2	36L0E154	PL. A. INOX. C-316L 1.50mmx1500mmx3000mm 2B		PL	1.000	241.54	241.54
3	TB4G1L20	TUBO A. INOX. C-304L SCH-40 C/C 1/2"		MT	12.000	4.22	50.64
						Sub total	438.86
						I.G.V 18.00 %	78.99
						<b>Total Cotización US\$ :</b>	<b>517.85</b>

**BRINDAMOS SERVICIO DE CORTE Y DOBLEZ DE ACUERDO A SUS NECESIDADES**

Plazo de Entrega : Inmediata, Salvo Venta Previa y/o sujeta a disponibilidad.

Forma de Pago : CONTADO INMEDIATO

Validez de la Oferta : 01 DIA

Observaciones : Pagadero en dólares americanos o soles al tipo de cambio vigente en la fecha de pago.  
Una vez pactadas las condiciones de venta y crédito, estas no podrán ser modificadas.

**Importante: Esta cotización se ha realizado en base a los cantidades totales de vuestra solicitud, de modificar su requerimiento los precios podrán estar sujetos a cambios y ser recotizados.**

Sin otro particular y a la espera de vernos favorecidos con vuestra orden de compra nos despedimos de Uds.

Atentamente,

  
Brenda Carrasco  
Ejecutivo de Ventas  
Celular: 998329500

**Horario de atención de almacén**

Lunes a Viernes: 08:00 - 11:30  
15:00 - 17:00

Sabados: 08:00 - 12:00

- Cotización de malla para el filtro de tierra fuller

# ALNICOLSA

MAQUINARIAS Y PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES

<http://taninos.tripod.com>

Callao-Ventanilla-Perú

Lima, 20 de junio de 2019

SEÑORES:

ATENCIÓN: Sr. Luis Gonzales

Referencia: Mallas Tyler (con soporte cilíndrico)

Le ofrecemos nuestra mejor oferta:

## MALLA INOX. C-304

CANTIDAD	DESCRIPCION	DIAMETRO INTERIOR	ALTURA DEL CILINDRO	PRECIO UNITARIO USD	PRECIO USD TOTAL
1 unidad	MALLA ACERO INOX C-304 MESH 30	8" (pulgadas) 20,3 cm	45 mm	100.00	100.00
2 unidades	MALLA ACERO INOX C-304 MESH 60	8" (pulgadas) 20,3 cm	45 mm	100.00	200.00

### TRANSFERENCIAS DEL EXTERIOR O INTERIOR:

- MATERIAL ENTREGA INMEDIATA: |
- FORMA DE PAGO: TRANSFERENCIA.

Banco de Crédito BCP (dólares)

Nº de cuenta: 19129649206191

Swif: BCPLPEPL

Nombre: Lorenzo Basurto Rodriguez.

Dirección: Mz. C Lte. 16 Francisco Tudela – Urb. Satélite – Ventanilla – Callao.

- VALIDEZ DE LA OFERTA: 07 DIAS



**Nota: nuestros precios no tienen IGV**

- Cotización de máquina purificadora de aceite

### Purificador de Aceite de Transformador de Vacío de Doble Etapas DVTP

**ACORE** Filtration Co., Ltd proporciona ingeniería, fabricación, venta de aceite industrial sistemas de filtración, Nos hemos estado esforzando para estudiar las necesidades de los usuarios Y a proporcionar soluciones de filtración para cada aplicación exigente a escala global.

**ACORE** Máquina de filtradora pueden ayudar a los clientes a mejorar la La calidad del aceite, extender la vida útil de los equipos, reducir los costs de mantenimiento Y mantener el equipo en optimas condiciones.Mientras tanto, Son muy eficaces, duraderas y faciles sistemas.



- Cotización de maquina purificadora de aceite



**ACORE FILTRATION CO.,LTD**

## COTIZACION OFICIAL

**A:**

Ing. Luis Gonzales Arrasco

Fecha: 24 de Junio de 2019

No.: AFC19624

### 1. Precio

Item	Descripción	Especificación	Cantidad	Precio unitario (USD)	Envío a Callao	Importe (USD)
1	DVTP-50 Purificador de aceite transformador de vacío de doble etapa	1. Capacidad: 3000 Litros por hora 2. bomba de vacío de paletas rotativas y bomba de vacío de raíces 3. Cámaras de desgasificación y deshidratación al vacío horizontales y verticales de doble etapa 4. Filtros gruesos y filtros de micras. 5. Eliminador automático de espuma de aceite. 6. Controlador PLC automático con pantalla táctil y panel de operación manual 7. bomba de entrada y bomba de salida 3000L/H 8. Fuente de alimentación: Personalizado	1 set	\$10,000	\$300	\$10,300
2	bomba de entrada y bomba de salida 3000L/H	como repuesto	2 set	\$650	—	\$1,300
3	Filtros	como repuesto, Incluye prefiltro y filtros finos.	1 set	\$280	—	\$280

- Análisis de costos de mantenimiento preventivo en subestaciones

UNIDAD		ANALISIS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN SUBESTACIONES		FECHA DE EJECUCION :		01/08/01	
CEROS				COSTO POR :		TRANSFORMADOR	
<b>REGENERADO EN CALIENTE MEDIANTE TIERRA FULLER DE TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE 30MVA-138/10.7KV MARCA BRUCE PEEBLES DE LA S.E. TRUJILLO SUR</b>				LUGAR		SUBESTACION TRUJILLO SUR	
transporte de Planta de Tratamiento y equipos, instalacion de los mismos cerca al transformador a regenerar, proveer fuentes de energia para planta de tratamiento, coordinacion e instrucciones de seguridad recibir orden y permiso de Trabajo, Revision de Equipos, herramientas y polizas de seguros del personal Carta de Seguridad, Revision de AST( Analisis Seguro de Trabajo), Recepcion de Transformador, mediante inspección minuciosa (puntos de entrada y salida de valvulas), puesta a tierra delimitar zona de trabajo y aterramiento solido de toda la planta de tratamiento menor a 10 ohm Toma de muestras de aceite, pruebas de rigidez dielectrica y tension Interfacial (Valores iniciales del Proceso) Tratado del sistema con aceite dielectrico (Camaras de desgasificado, Mangueras y Bypass ) antes de iniciar el proceso, no debe aparecer burbujas en todo el sistema Control constante de la Operacion del Sistema anotando Temperaturas del aceite, de la planta, medio ambiente; presiones de vacio y en tuberías, cambios de tierra fuller y reposición de aceite dielectrico Tomar muestras de aceite, para pruebas de rigidez dielectrica y tension Interfacial durante proceso y control de los mismos hasta obtener los valores garantizados Aplicacion mediante proceso de termovacio el inhibidor del aceite Entrega de Informe, reporte y pruebas finales de analisis Fisico -Químicos y Cromatograficos del aceite				CANTIDAD DE ACEITE TRATADO		19,100 Kg	
				TABLA DE RENDIMIENTOS (En 198 horas) POR TRAFO			
				REN.CUADRILLA		1.0	
				FACTOR REND.		1.0	
EQUIPACION				CANTID.		HORAS	
Máquina 1000 Kg. Doble cabina, doble traccion				1.00		198.0	
Cable en grua de 6 Tn.				1.00		16.0	
Planta de Tratamiento de Aceite dielectrico de 2000lt/ hora, marca Micafil				1.00		198.0	
COSTO POR : Bach. Samuel Francisco Pongo Porras				REN.EQUIPOS		1.0	
				PERSONAL BASE :		Principal	
				INGENIERO :		1.0 = 198.0	
				SUPERV. TEC :		1.0 = 198.0	
				TECNICO :		5.0 = 990.0	
				METRADO		COSTOS (U.S.\$)	

COSTO POR : Bach. Samuel Francisco Pongo Porras							
COD	DESCRIPCION	METRADO		COSTOS (U.S.\$)			
		UNID.	CANTID.	UNITARIO	PARCIAL	SUB-TOTAL	%
	<b>MATERIALES CONSUMIBLES :</b>						
	Tierra fuller LVM Tipo 30/60 MESH	Kg	3400.00	0.96	3,264.00	3264.00	
	Aceite dielectrico marca Shell tipo Diala "D"	Kg	2618.00	2.10	5,497.80	5497.80	
	Inhibidor Sintetico para el aceite dielectrico tipo IONOL CP	Kg	75.00	5.00	375.00	375.00	
	Filtros de 0.5 micras para maquina de tratamiento	Cant.	30.00	10.00	300.00	300.00	
	Empaquetaduras de corcho y neoprene	Glb.	1.00	60.00	60.00	60.00	
						9,496.80	43.59
	<b>MANO DE OBRA :</b>						
	INGENIERO	H.H.	198.00	8.41	1,665.18		
	SUPERV. TEC.	H.H.	198.00	3.50	693.00		
	TECNICO	H.H.	990.00	2.25	2,227.50		
						4,585.68	21.05
	<b>HERRAMIENTAS Y EQUIPOS :</b>						
	Herramientas varias, IPP y EPP	EST.	10%		458.57		
	Polizas de seguros	CANT.	7.00	10.00	70.00		
	Camioneta 1000 kg.	H.M	198.00	10.00	1,980.00		
	Camión grua de 6 Tn.	H.M	16.00	40.00	640.00		
	Planta de Tratamiento de aceite dielectrico	H.M	198.00	23.00	4,554.00		
						7,702.57	35.36
	<b>COSTO DIRECTO</b>				U.S.\$	21,785.05	
	<b>G.G., D.T. Y UTILIDADES</b>				U.S.\$	4,357.01	
	<b>TOTAL</b>				U.S.\$	26,142.06	

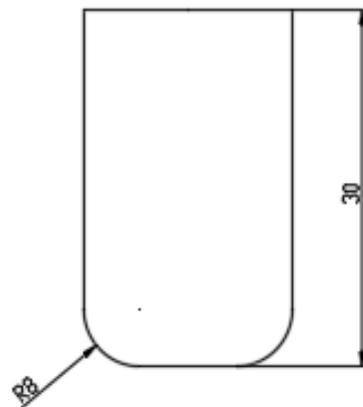
- Análisis de costos de mantenimiento preventivo en subestaciones

ACTIVIDAD		ANALISIS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN SUBESTACIONES		FECHA DE EJECUCION :		01/08/01	
PROCESOS				COSTO POR :		TRANSFORMADOR	
<b>CAMBIO DE ACEITE DIELECTRICO EN TRANSFORMADOR DE POTENCIA FUERA DE SERVICIO DE 30MVA-138/10.7KV MARCA BRUCE PEBLES DE LA S.E. TRUJILLO SUR</b>				LUGAR		SUBESTACION TRUJILLO SUR	
Transporte de Planta de Termovacio y equipos, instalacion de los mismos cerca al transformador para cambio de aceite, proveer fuentes de energia para planta de tratamiento, coordinacion e instrucciones de seguridad				CANTIDAD DE ACEITE TRATADO		19100Kg	
Recabar orden y permiso de Trabajo, Revision de Equipos, herramientas y polizas de seguros del personal				TABLA DE RENDIMIENTOS (En 198 horas) POR TRAF0			
Charra de Seguridad, Revision de AST( Analisis Seguro de Trabajo), Recepcion de Transformador, mediante inspección minuciosa (puntos de entrada y salida de valvulas), puesta a tierra				REN.CUADRILLA		1.0	
Delimitar zona de trabajo y aterramiento solido de toda la planta de tratamiento menor a 10 ohm							
Toma de muestras de aceite, pruebas de rigidez dielectrica y tension Interfacial (Valores iniciales del Aceite a cambiar)							
Lubricado del sistema con aceite dielectrico (Camaras de desgasificado, Mangueras y Bypas ) antes de iniciar el proceso, no debe aparecer burbujas en todo el sistema							
Retirar Aceite dielectrico envejecido del Transformador, almacenar en cilindros cerrados para disposicion final				FACTOR REND.		1.0	
en almacenes definitivos, efectuar limpieza interior y recirculacion del aceite con transformador fuera de servicio							
Toma de muestras de aceite, para pruebas de rigidez dielectrica y tension Interfacial (Valores finales despues del cambio de aceite) los mismos que se efectuaran con el transformador fuera de servicio							
Acondicionar mediante proceso de termovacio el inhibidor del aceite y con el transformador en marcha							
Entrega de Informe, reporte y pruebas finales de analisis Fisico -Quimicos y Cromatograficos del aceite							
ESPECIFICACION		CANTID.	HORAS	REN.EQUIPOS		1.0	
Motoneta 1000 Kg. Doble cabina, doble traccion		1.00	72.0				
Móvil grúa de 6.0 Tn.		1.00	16.0	PERSONAL BASE :			
Planta de Tratamiento de Aceite dielectrico de 2000lt/ hora		1.00	72.0	INGENIERO :		Principal	
				SUPERV. TEC :		1.0 = 72.0	
				TECNICO :		1.0 = 72.0	
						2.0 = 144.0	
Elaborado por : Bach. Samuel Francisco Pongo Porras							

CH0 POR : Bach. Samuel Francisco Pongo Porras						
COD	DESCRIPCION	METRADO		C O S T O S (U.S.\$)		
		UNID.	CANTID.	UNITARIO	PARCIAL	SUB-TOTAL
	<b>MATERIALES CONSUMIBLES :</b>					
	Aceite dielectrico marca Shell tipo Diala "D"	Kg	19800.00	2.10	41,580.00	41580.00
	Inhibidor Sintetico para el aceite dielectrico tipo IONOL CP	Kg	75.00	5.00	375.00	375.00
	Filtros para maquina de tratamiento	Cant.	6.00	10.00	60.00	60.00
	Empaquetaduras de corcho y neoprene	Glb.	1.00	60.00	60.00	
						42,075.00 90.93
	<b>MANO DE OBRA :</b>					
	INGENIERO	H.H.	72.00	8.41	605.52	
	SUPERV. TEC.	H.H.	72.00	3.50	252.00	
	TECNICO	H.H.	144.00	2.25	324.00	
						1,181.52 2.55
	<b>HERRAMIENTAS Y EQUIPOS :</b>					
	Herramientas varias, IPP y EPP	EST.	10%		118.15	
	Polizas de seguros	CANT.	4.00	10.00	40.00	
	Camioneta 1000 kg.	H.M	72.00	10.00	720.00	
	Camión grua de 6 Tn.	H.M	16.00	30.00	480.00	
	Planta de Tratamiento de aceite dielectrico	H.M	72.00	23.00	1,656.00	
						3,014.15 6.51
						<b>COSTO DIRECTO U.S.\$ 46,270.67</b>
						<b>G.G., D.T. Y UTILIDADES U.S.\$ 9,254.13</b>
						<b>TOTAL U.S.\$ 55,524.81</b>

- PLANOS DE LA MAQUINA

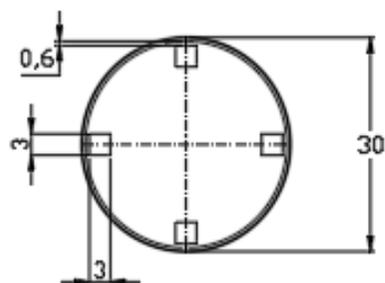
VISTA FRONTAL



VISTA ISOMETRICA



VISTA DE PLANTA



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA



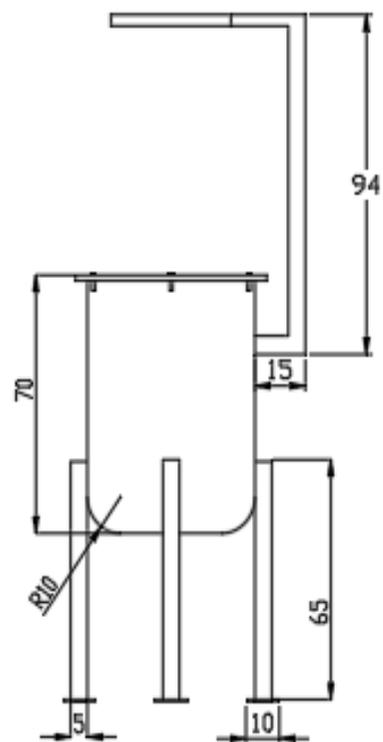
DIBUJADO POR : Gonzales Arrasco Luis

Formato:  
A4

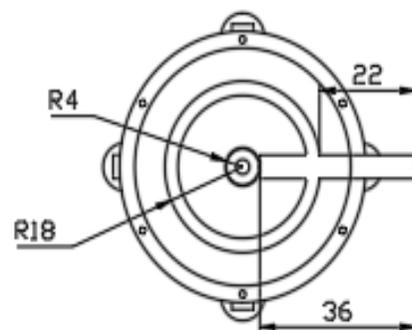
NOMBRE DE LA PIEZA: Reactor 1

Unidad :  
cm

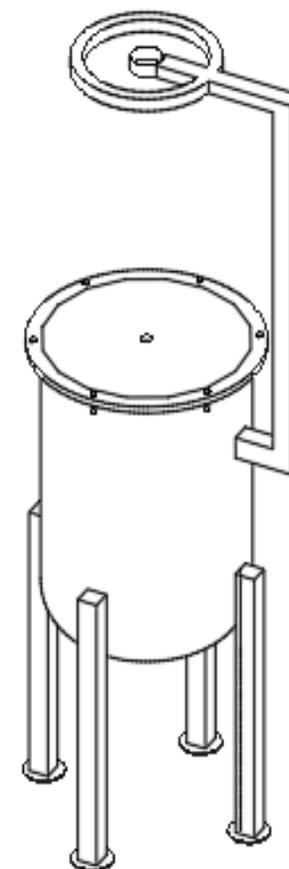
VISTA FRONTAL



VISTA PLANTA



VISTA ISOMETRICA



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

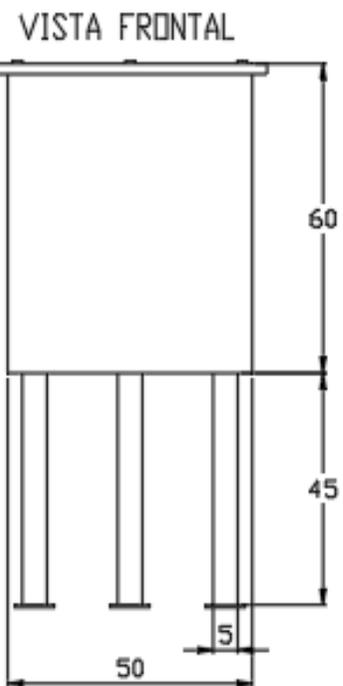


DIBUJADO POR : Gonzales Arrasco Luis

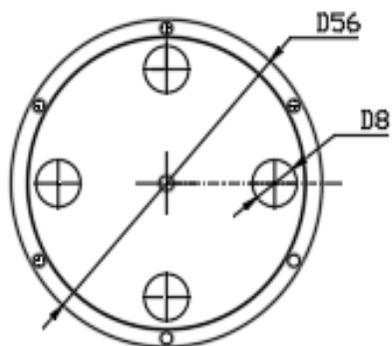
Formato:  
A4

NOMBRE DE LA PIEZA: Reactor 2

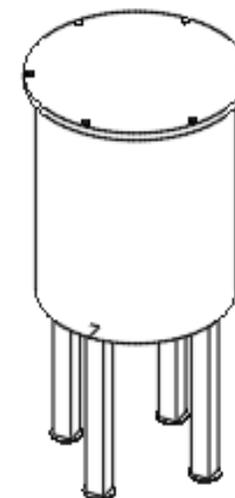
Unidad :  
cm



VISTA PLANTA



VISTA ISOMETRICA



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA



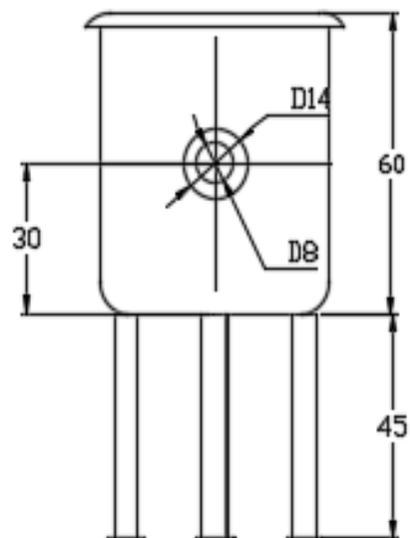
DIBUJADO POR : Gonzales Arrasco Luis

Formato:  
A4

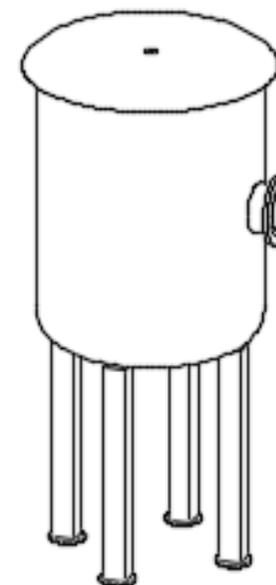
NOMBRE DE LA PIEZA: CALENTADOR

Unidad :  
cm

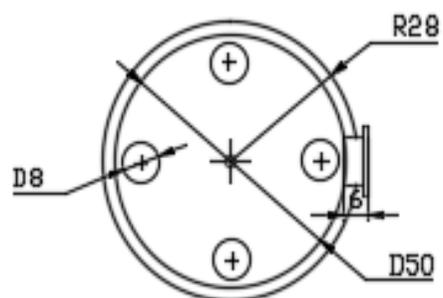
VISTA FRONTAL



VISTA ISOMETRICA



VISTA PLANTA



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA



DISEÑADO POR

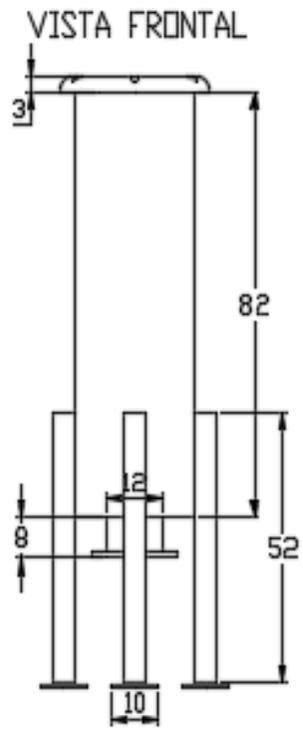
Gonzales Arrasco Luis

Formato  
A4

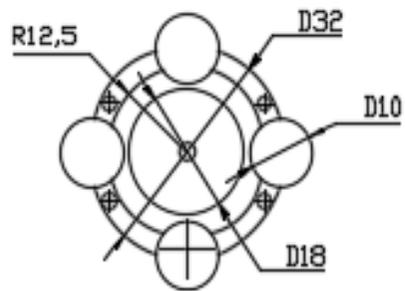
NOMBRE DE LA PIEZA:

DESHIDRATADOR

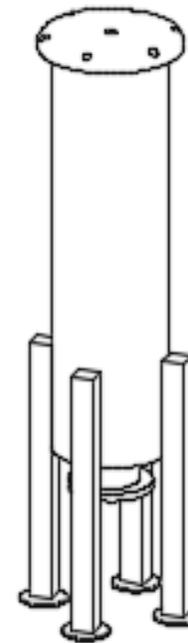
Unidad  
cm



VISTA PLANTA



VISTA ISOMETRICA



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA



DISEÑADO POR

Gonzales Arrasco Luis

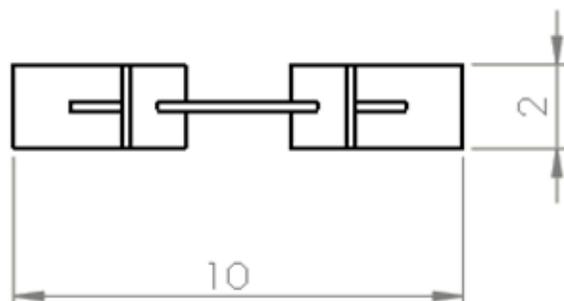
Formato  
A4

NOMBRE DE LA PIEZA:

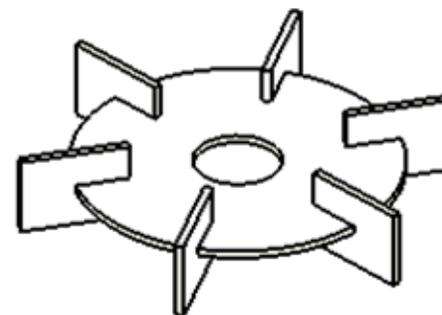
FILTRO DE FULLER

Unidad  
cm

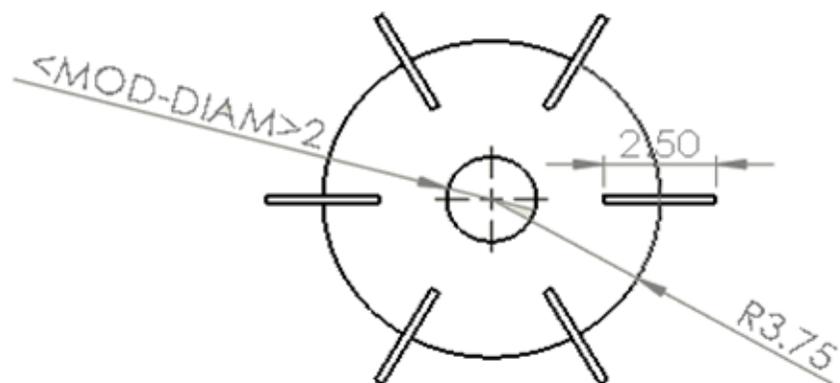
VISTA FRONTAL



VISTA 3D



VISTA SUPERIOR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA



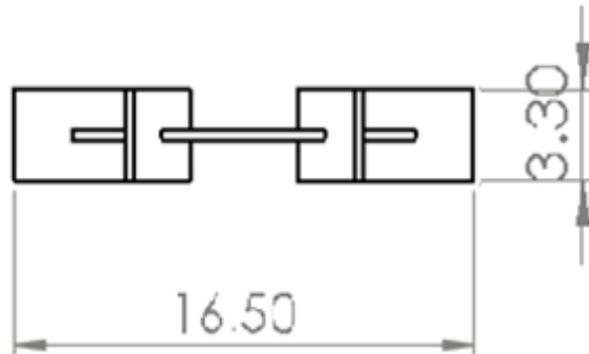
DIBUJADO POR : Gonzales Arrasco Luis

Formato:  
A4

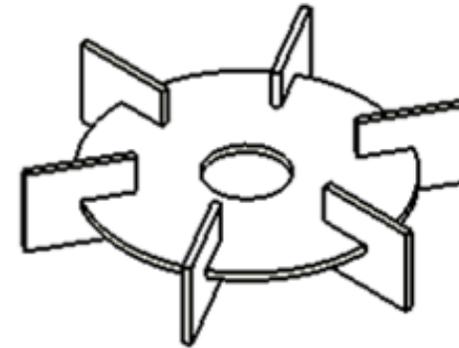
NOMBRE DE LA PIEZA: IMPULSADOR 1

Unidad :  
cm

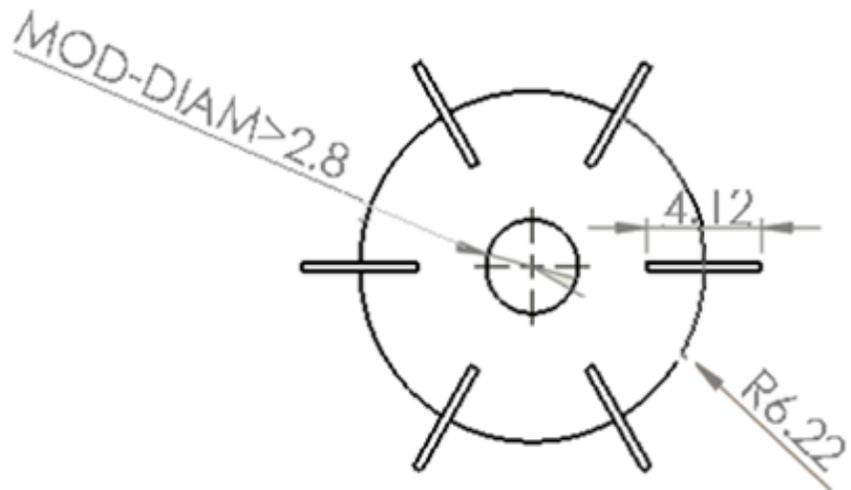
VISTA FRONTAL



VISTA 3D



VISTA SUPERIOR



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

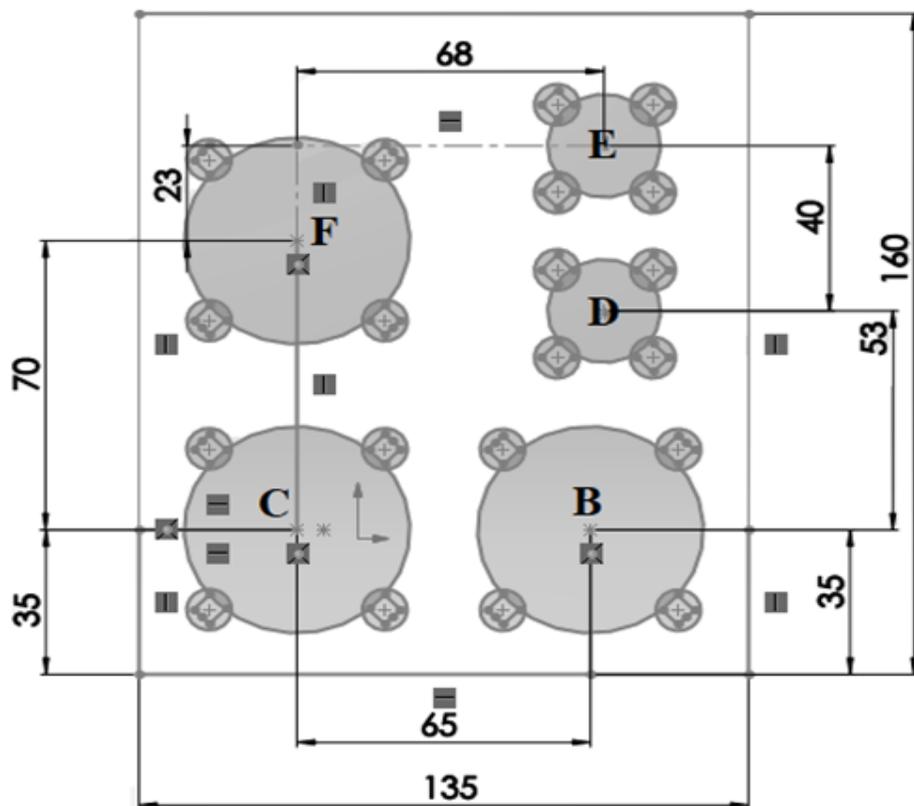
DIBUJADO POR : Gonzales Arrasco Luis

Formato:  
A4

NOMBRE DE LA PIEZA: IMPULSADOR 2

Unidad :  
cm





Leyenda	
A	Reactor 1
B	Reactor 2
C	CALENTADOR
D	FILTROS FULLER 1
E	FILTROS FULLER 2
F	DESHIDRATADOR

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA



DIBUJADO POR :

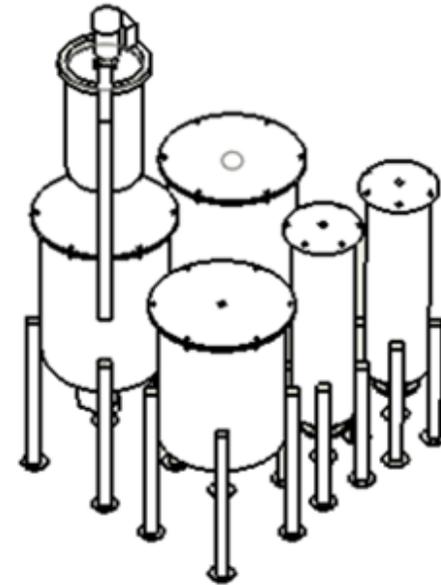
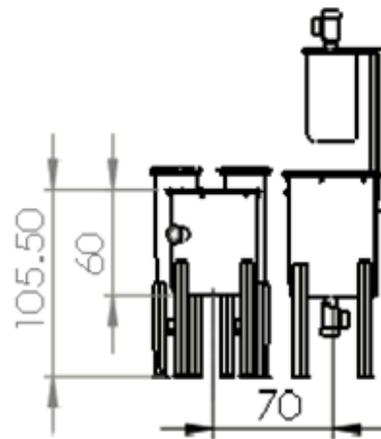
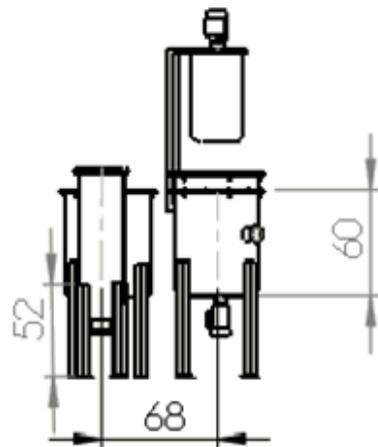
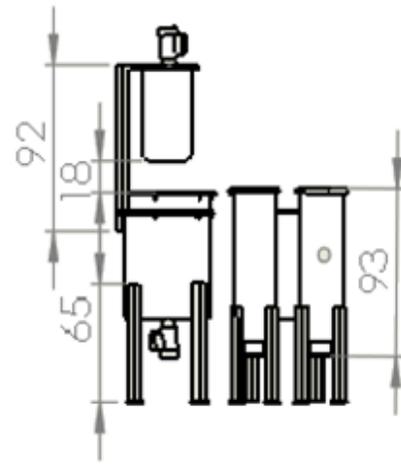
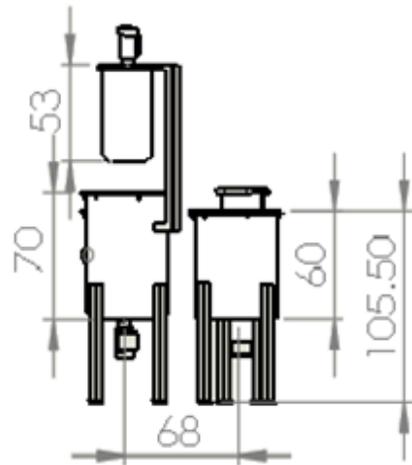
Gonzales Arrasco Luis

NOMBRE DE LA PIEZA:

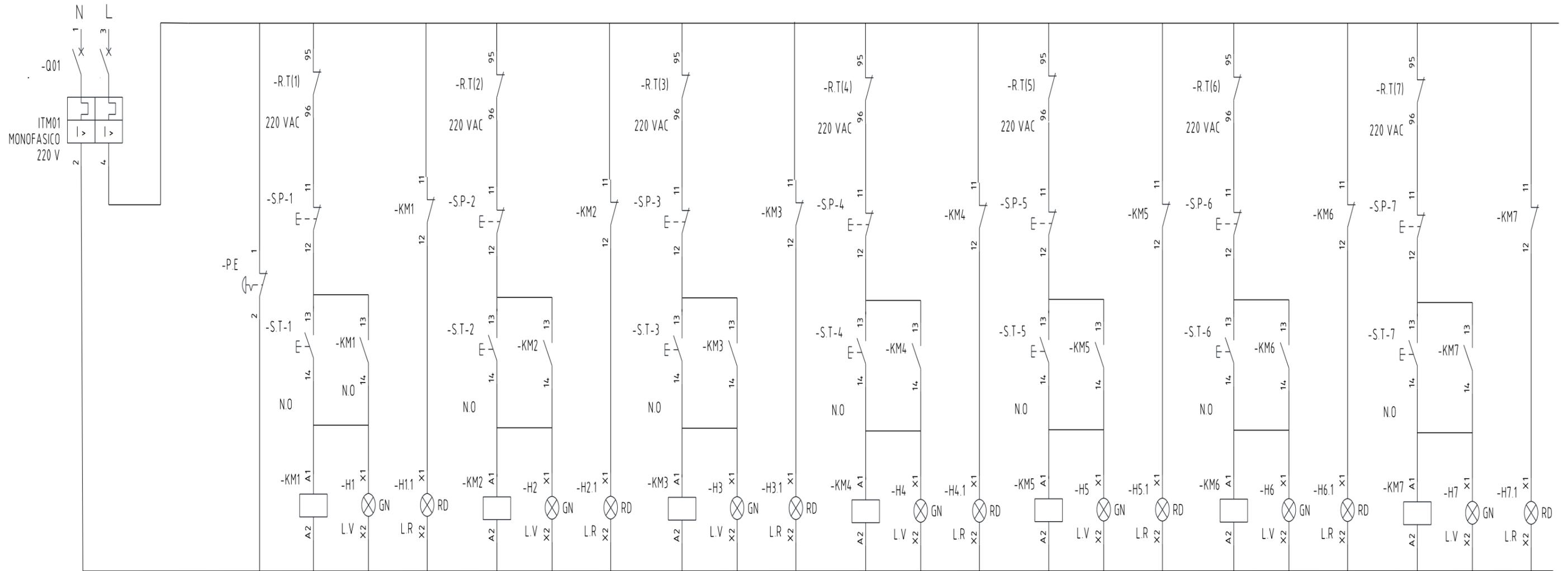
VISTA DE PLANTA

Formato:  
A4

Unidad :  
cm

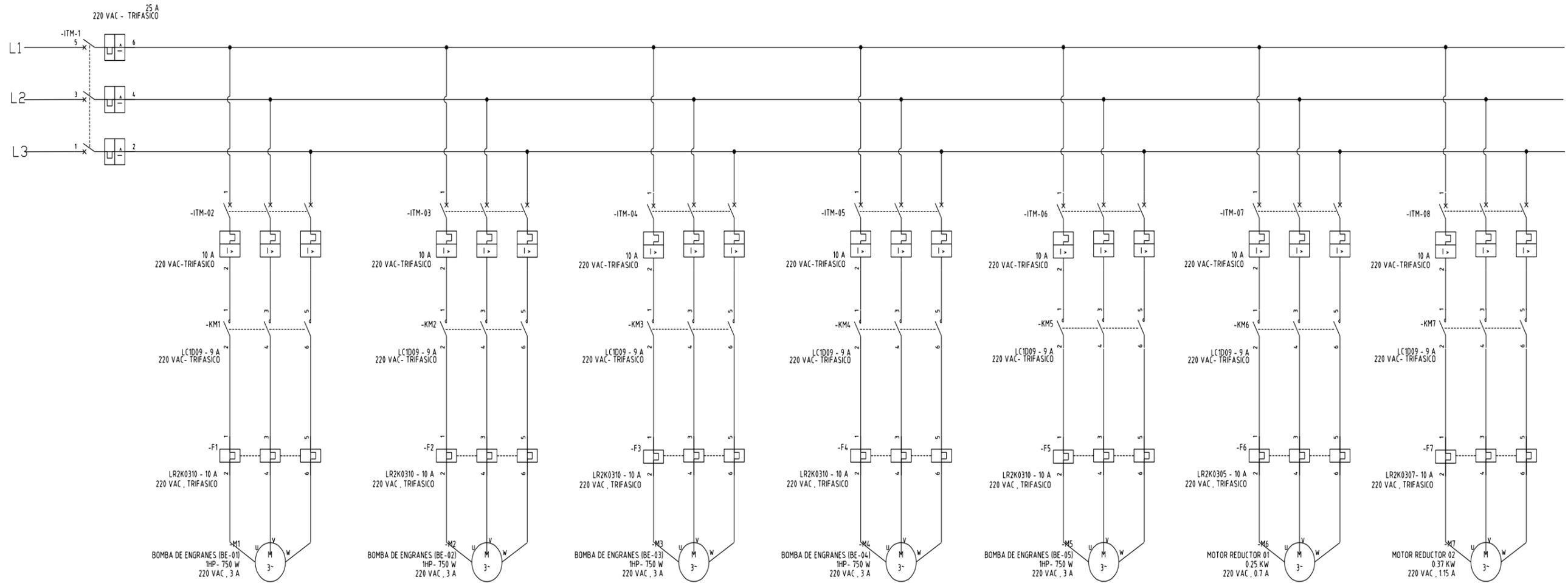


ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA		
 USAT Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo	DIBUJADO POR :	Gonzales Arrasco Luis
	NOMBRE DE LA PIEZA:	MAQUINA PURIFICADORA
	Formato:	A4
	Unidad :	cm



LEYENDA  
 P.E:Paro de emergencia  
 Q01: Llave termomagnetica monofasica  
 R.T:Rele termico  
 S.P:Stop  
 S.T:Start  
 KM: Contacto  
 L.E:Luz verde  
 L.R:Luz roja  
 N.O:Normalmente abierto

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA		
	DIBUJADO POR :	Gonzales Arrasco Luis
	NOMBRE DEL PLANO:	Formato: A3 CIRCUITO DE CONTROL



LEYENDA
ITM : INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO
KM: CONTACTOR
F: RELE TERMICO
M: MOTOR ELECTRICO

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

DIBUJADO POR :

Gonzales Arrasco Luis

Formato:  
A3

NOMBRE DEL PLANO:

CIRCUITO DE POTENCIA



## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. L. Ceballos Sánchez, E. García Maldonado, “Análisis técnico del líquido contenido como refrigerante y aislante en transformadores”, Tesis de Ingeniería, Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México D. F., México, 2013
- [2] Manual para la Gestión Integral de Bifenilos Policlorados – PCB, Desarrollo de la Capacidad Nacional para la Gestión y Eliminación Ambientalmente Adecuada de PCB en Colombia, Colombia, 2015
- [3] M. C. Mendoza Zegarra, “ESTRATEGIA PARA LA GESTIÓN AMBIENTALMENTE REGIONAL DE BIFENILOS POLICLORADOS (PCB) EN EL PERÚ, CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS”, Tesis en Desarrollo Ambiental, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2013.
- [4] Brettis, Tutoriales Lubricación, Modulo8: TRANSFORMADORES [online]. España, Disponible en <http://www.brettis.com/Tutorial/08Transformadores.pdf>
- [5] P. Avelino Pérez “TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION. Teoría, cálculo, construcción y pruebas”, 2 Edición, Editorial Reverté , Mexico , 2001, pág.(5-6)
- [6] P. Avelino Pérez “TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION. Teoría, cálculo, construcción y pruebas”, 2 Edición, Editorial Reverté , Mexico , 2001, pág.(10-12)
- [7] C.R. Tapia Arias, “REPOTENCIACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE LA PURIFICADORA DE ACEITE DIELECTRICO MARCA KATO UTILIZADA EN LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUANGOPOLO DE LA EMPRESA CELEC EP TERMOPICHINCHA”, Tesis de Ingeniería, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, 2014
- [8] MINAM, PROCEDIMIENTO DE MANEJO DE PCB DURANTE EL MANTENIMIENTO DE EQUIPOS, Dirección de Calidad Ambiental, Lima.
- [9] J.L. Ceballos Sánchez, E. García Maldonado, “ANÁLISIS TÉCNICO DEL LIQUIDO CONTENIDO COMO REFRIGERANTE Y AISLANTE EN TRANSFORMADORES”, Tesis de Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional, México D. F., 2013
- [10] P. Reis Tenajas, “ANÁLISIS DEL ENVEJECIMIENTO DEL ACEITE DE UN TRANSFORMADOR MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA MEDIDA EN BAJA FRECUENCIA”, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2009.
- [11] C. Alvarado, ASPECTOS GENERALES DE PRUEBAS DE ACEITE TRANSFORMADORES DE POTENCIA, Universidad ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2014

- [12] M. G. Briones Martínez, “ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA RECUPERACIÓN DE LOS ACEITES DIELECTRICOS CON TIERRA FULLER Y DESLODIFICACIÓN DE BOBINADOS EN TRANSFORMADORES”, Tesis de Ingeniería, Ingeniería Eléctrica, Escuela Superior Politécnica del Litoral , Guayaquil , Ecuador , 2005.
- [13] PNI-COP, “INVENTARIO NACIONAL DE BIFENILOS POLICLORADOS”, Proyecto GEF/PNUMA N° GFL-2328 - 2761 – 4747, 2006”
- [14] J. Loayza, M. Silva, E. Cueva, M. Polo, G. Arce, A. Casafranca, “IDENTIFICACION DE TECNOLOGÍAS PARA EL MANEJO RESPONSABLE DE RESIDUOS Y DESECHOS DE BIFENILOS POLICLORADOS (PCB)” Revista Química, vol. 19, págs. 41- 54, Mayo, 2016.
- [15] Cámara Empresaria del Medio Ambiente, Gestión de aparatos y aceites contaminados con PCB'S, Elemento y Equipos Eléctricos, [Online], disponible en <https://sistemamid.com/preview.php?a=108682&mosres=1&r=11655&d=&rutaAnterior=7097,7140,14745,10947,11655&pag=1#contenedor-comentarios> ,2014
- [16] E. Lopera Posada, “PURIFICACION DE ACEITE AISLANTES CONTAMINADOS CON BIFENILOS POLICLORADOS (PCB's)”, Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2006.
- [17] C. Zambrano, L. Fernández, “ESTUDIO PARA EL MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO MENOR APLICADO A TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN TIPO POSTE DE LA EMPRESA ENELVEN”, Escuela de Eléctrica, Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela, 2006.
- [18] PNUMA, “ENCUESTA SOBRE TECNOLOGÍAS ACTUALMENTE DISPONIBLES PARA LA DESTRUCCION DE PCB SIN INCINERACIÓN”,
- [19] P. Avelino Pérez “TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION. Teoría, cálculo, construcción y pruebas”, 2 Edición, Editorial Reverté , Mexico , 2001, pág.(35-50)
- [20] F. Arbelàez Yory, D. Sanz del Castillo, DISEÑO Y CONSTRUCCION DE MÁQUINA CONTROLADA PARA LA PRODUCCION DE BIODISEL., Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá , Colombia , 2008
- [21] L.D. Wachong Solano, ANÁLISIS TÉCNICO DE LA IMPLEMENTACION DEL PROCESO DE DECLORACION, REGENERACION Y RECUPERACION DEL ACEITE DIELECTRICO CONTAMINADO CON BIFENILOS POLICLORADOS, Facultad de Ingeniería , Escuela Ingeniería Química , Universidad de costa rica , San José , Costa rica , 2015.

- [22] método para la descomposición de compuestos orgánicos halogenados, de la patente US 4400552 [patente]
- [23] Bonnet Suministros y maquinarias S.L
- [24] Transport phenomena: a unified approach de Brodkey y Hershey.
- [25] Castillo Uribe, DISEÑO Y CALCULO DE UN AGITADOR DE FLUIDOS, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Mecánica , Universidad del Bío Bío.
- [26] Diseño de ejes con la norma ASME [Online] , Disponible en <https://edoc.site/diseo-de-ejes-con-la-norma-asme-pdf-free.html>
- [27] Yunus A. Cengel , TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Tercera edición. 2007
- [28] Robert L. Mott, Mecánica de fluidos. Sexta edición ,2006.
- [29] Principios de operaciones unitarias , Alan S. Foust
- [30] Samuel Francisco Pongo Porras, Regeneración de aceite dieléctrico del transformador de potencia de 30MVA 138/10,7 Kv de la subestación Trujillo Sur en Servicio,2008