



**ESTUDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL TRATADOR
TÉRMICO-ELECTROSTÁTICO EN LA
ISLA VI DEL CAMPO CANTAGALLO**

OSWALDO MANCILLA HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES BUCARAMANGA**

2008



**ESTUDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL TRATADOR
TÉRMICO-ELECTROSTÁTICO EN LA
ISLA VI DEL CAMPO CANTAGALLO**

OSWALDO MANCILLA HERNÁNDEZ

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar
el título de Ingeniero Electricista**

Director:

Dr. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Codirector:

Ing. GUIDO BERNIER MONTES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES BUCARAMANGA**

2008



DEDICATORIA

A Dios nuestro padre, por brindarme la oportunidad de salir a delante y que cada instante me ofrece compañía y fortaleza para lograr mis objetivos propuestos.

A mis padres José Manuel Mancilla y Ana Lucia Hernández, por su gran apoyo, preocupación, confianza y amor incondicional, por su perseverancia para hacer de este hombre un gran profesional.

A cada uno de los miembros de mi familia que confían en mis capacidades, que me manifiestan su apoyo e imponen su confianza en mí.

OSWALDO MANCILLA HERNÁNDEZ

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores que me formaron como profesional e ingeniero, quienes han sabido transmitirme sus conocimientos e ideas, especialmente a:

Dr. Hermann Raúl Vargas Torres por sus valiosas orientaciones y por su profesionalismo.

Al ingeniero Guido Bernier Montes por su seguimiento, colaboración, credibilidad e intermediario de CONFIPETROL con ECOPETROL para el propósito de este proyecto.

A la gran empresa CONFIPETROL por darme la oportunidad de la realización del presente proyecto, empresas como esta son las que necesita el país que apoyan los futuros profesionales y en especial al Ingeniero Luís Earles Delgado, gerente de la empresa, por su incondicional colaboración.

A la Universidad Industrial de Santander, en donde se fortaleció mi carácter, se enriquecieron y consolidaron mis conocimientos y se forjó mi espíritu.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. GENERALIDADES	20
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivo general	20
1.1.2 Objetivos específicos	20
1.2 ALCANCES Y RESULTADOS DEL PROYECTO	20
2. DESHIDRATACIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO	22
2.1 EMULSIÓN	23
2.1.1 Tipo de emulsión y distribución de tamaños	24
2.1.2 Producción de las emulsiones agua en petróleo	25
2.1.3 Prevenir la formación de la emulsión agua en petróleo	29
3. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA DESHIDRATACIÓN DE CRUDO	31
3.1 SEPARADORES GRAVITACIONALES	31
3.2 CALENTADORES	33
3.3 COALESCEDORES ELECTROSTÁTICOS	36
4. DESALADO DEL CRUDO	39
5. ESTUDIO DEL TRATADOR TÉRMICO ELECTROSTÁTICO	42
5.1 LEVANTAMIENTO	45
5.1.1 Metodología utilizada	45
5.1.2 Estado actual del tratador térmico-electrostático	45
5.1.3 Instrumentación	47
5.2 SISTEMA DE CONTROL	52
5.2.1 Control de interfase	52
5.2.2 Control de temperatura	53
5.2.3 Control de presión	54
5.2.4 Sistema desarenador	54

6. ESTUDIO DE LAS SECCIONES QUE CONFORMAN EL TRATADOR TÉRMICO ELECTROSTÁTICO	56
6.1 EL TRATADOR TÉRMICO ELECTROSTÁTICO ESTA CONFORMADO POR LAS SIGUIENTES SECCIONES.	58
6.1.1 Sección de Desgasificación	58
6.1.2 Sección de Calentamiento	66
6.1.3 Sección Diferencial	71
6.1.4 Sección de Coalescencia	72
6.1.5 Características de diseño del tratador térmico electrostático	108
6.1.6 Predisposición del sistema de coalescencia para la mejor deshidratación del crudo	117
6.1.7 Factores que afectan la ejecución de Coalescencia Electrostática	122
7. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DEL TRATADOR TÉRMICO ELECTROSTÁTICO	127
7.1 RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA DEL SUELO	128
7.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO	129
7.2.1 Método de Frank Wenner	129
7.2.2 Selección e instalación del electrodo	129
7.3 LA BOBINA DE CHOQUE	130
8. CONCLUSIONES	132
BIBLIOGRAFÍA	134
ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Microfotografía de una emulsión agua en aceite.	22
Figura 2. Diferentes tipos de emulsión.	24
Figura 3. Estabilización de una gota de agua por agentes emulsionantes.	27
Figura 4. Fotografía de un Eliminador de Agua Libre.	31
Figura 5. Fotografía de los calentadores de la planta deshidratadora	33
Figura 6. Calentador de crudo tipo vertical.	34
Figura 7. Calentador de crudo tipo horizontal.	35
Figura 8. Deshidratador Electrostático.	36
Figura 9. Proceso de Deshidratación y Desalado	39
Figura 10. Tratador Térmico Electrostático	42
Figura 11. Distribución del agua, gas y crudo en el TTE.	52
Figura 12. Partes y flujo interno del Tratador Térmico- Electrostático.	56
Figura 13. Sección de Desgasificación	59
Figura 14. Sección de Calentamiento del petróleo crudo.	66
Figura 15. Fotografía de la entrada de crudo a la Sección de Calentamiento.	67
Figura 16. Fotografía del control de nivel y temperatura de la Sección de Calentamiento.	69
Figura 17. Fotografía de la válvula de control de gas de la Sección de Calentamiento.	70
Figura 18. Fotografía de la Sección Diferencial.	71
Figura 19. Fotografía de la Sección de Coalescencia.	72
Figura 20. Fotografía del Sistema Electrostático.	77
Figura 21. Estructura de la molécula de Agua.	78
Figura 22. Atracción entre gotas emulsionadas.	79
Figura 23. Esquema de aplicación del Campo Electrostático.	81

Figura 24. Representación de comportamiento de las gotas de agua en comparación con la onda sinusoidal AC.	82
Figura 25. Dipolo de agua formado por el Campo Eléctrico externo.	84
Figura 26. Movimiento de una gota de agua entre dos electrodos de polaridad dual.	84
Figura 27. Perfil de intensidad de corriente en función del tiempo durante la deshidratación electrostática de una emulsión agua en petróleo crudo.	86
Figura 28. Esquema del proceso de Electro-Coalescencia.	87
Figura 29. Líneas de Campo Eléctrico entre placas.	88
Figura 30. Nivel de crudo entre placas.	89
Figura 31. Fuerza del crudo entre placas.	90
Figura 32. Condensador plano paralelo	91
Figura 33. Placas paralelas en forma horizontal.	91
Figura 34. Carga superficial en las placas paralelas.	92
Figura 35. Campo creado por una placa plana indefinida, cargada.	94
Figura 36. Densidad de Flujo Eléctrico de forma vectorial.	95
Figura 37. Campo Eléctrico entre placas.	96
Figura 38. Celda de conductividad.	97
Figura 39. Tensión en función del Campo Eléctrico entre placas.	99
Figura 40. Percolación en emulsiones w/o.	100
Figura 41. Transformador del sistema de potencia de la Sección de Coalescencia	101
Figura 42. Circuito unifilar del transformador de tensión de doble polaridad del TTE.	102
Figura 43. Diagrama unifilar del sistema de control de la Sección Electrostática.	103
Figura 44. Corriente en función de la Tensión en los electrodos de la Sección de Coalescencia.	104
Figura 45. Partes externas que conforman el transformador de tensión.	105

Figura 46. Sistema de desconexión del transformador.	105
Figura 47. Componentes y dimensiones de la Sección de Coalescencia.	106
Figura 48. Sistema de placas paralelas.	107
Figura 49. Fotografía del control de nivel de la Sección de Coalescencia.	108
Figura 50. Viscosidad del crudo en función de la temperatura aplicada.	114
Figura 51. Gravedad API del crudo en función de la Temperatura aplicada.	115
Figura 52. Incremento de la temperatura en función del calor aplicado.	116
Figura 53. Diferencia De los mejores resultados de Deshidratación entre corriente DC y AC del Tratador de Cantagallo.	120
Figura 54. Diferentes series de % de deshidratación tomada para la comprobación de la densidad de campo eléctrico estipulado.	121
Figura 55. Efecto del pulso de frecuencia en el proceso de Coalescencia.	123
Figura 56. Efecto de la fase de radio en el proceso de Coalescencia	124
Figura 57. La comparación el convencional y los electrodos aislados para un Coalescedor Electrostático.	125
Figura 58. Diseño del sistema de puesta a tierra del TTE.	127
Figura 59. Método de Wenner.	129
Figura 60. Electrodo vertical.	130
Figura 61. Bobina de choque conectada al barraje equipotencial.	131

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Componentes del sistema de medición de nivel.	48
Tabla 2. Componentes del sistema de medición de presión.	49
Tabla 3. Componentes del sistema de medición de temperatura.	50
Tabla 4. Datos de placa del transformador térmico del TTE.	50
Tabla 5. Datos de placa de los motores de la Sección de Desgasificación.	51
Tabla 6. Potencia y corriente consumida en varios intervalos de tiempo.	104
Tabla 7. Características del crudo y aplicación de diseño dependiente de la temperatura aplicada	115
Tabla 8. Calor requerido para aumentar ha determinado gradiente de temperatura.	116
Tabla 9. Variables internas de la densidad de campo electrostático.	118
Tabla 10. Porcentaje de Deshidratación a diferentes condiciones de corriente AC y DC.	119
Tabla 11. Comprobación de la densidad de campo eléctrico de 23 KV/7cm para el TTE.	121

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Esquema del proceso de deshidratación en la Planta Deshidratadora de la Isla VI del Campo Cantagallo	137
Anexo B. Problemas operacionales	138

GLOSARIO¹

ÁNODOS DE SACRIFICIO: el Ánodo galvánico o Ánodo de sacrificio fue la primera técnica de protección catódica utilizada. Se denomina de esta manera porque protegen de la corrosión a otro material, soportando toda la corrosión hasta que se agotan.

COQUE: producto sólido, muy cargado de carbono, de densidad próxima a 1.2, color entre pardo oscuro y gris negro y estructura celular o granular (sirve para la fabricación de electrodos de grafito artificial, abrasivos, pigmentos, y como combustible). Existen muchas empresas cuya materia prima es coque en piedra y el producto es coque con un diámetro de partícula muy pequeño.

DIELECTROPHORESIS: se define como el movimiento lateral imparten en partículas descargadas como resultado de la polarización inducida por la falta de uniformidad en los campos eléctricos.

EFEECTO COTTREL: aplicación de un Campo Eléctrico de alta tensión a una emulsión.

EFLUENTE: la salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua, a un tanque de oxidación, a un tanque para un proceso de depuración biológica del agua, etc. Este es el agua producto dada por el sistema

ELECTROFORESIS: la electroforesis es un método de laboratorio en el que se utiliza una corriente eléctrica controlada con el fin de separar biomoléculas según su tamaño y carga eléctrica a través de una matriz gelatinosa.

¹ Wikipedia <http://es.wikipedia.org/wiki/>

EMULSIONANTE: se denomina así a los aditivos alimentarios encargados de facilitar el proceso de emulsión de los ingredientes. Estos mismos emulgentes también son utilizados en Cosmética, pero entonces se denominan de manera diferente, siguiendo la Nomenclatura Internacional de Ingredientes Cosméticos (INCI).

FLUOROCARBONOS: son compuestos químicos que contienen enlaces carbono-flúor. La relativamente baja reactividad y alta polaridad del enlace carbono-flúor los dota de características únicas. Los fluorocarbonos tienden a romperse muy lentamente en el medio ambiente y por tanto muchos se consideran contaminantes orgánicos persistentes. Muchos fluorocarbonos comercialmente útiles también contienen hidrógeno, cloro y bromo.

GRAVEDAD API: de sus siglas en inglés American Petroleum Institute, es una medida de densidad que describe que tan pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua. Si los grados API son mayores a 10, es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en esta. La gravedad API es también usada para comparar densidades de fracciones extraídas del petróleo. Por ejemplo, si una fracción de petróleo flota en otra, significa que es más liviana, y por lo tanto su gravedad API es mayor. Matemáticamente la gravedad API no tiene unidades (ver la fórmula abajo). Sin embargo siempre al número se le coloca la denominación grado API. La gravedad API es medida con un instrumento denominado hidrómetro. Existen una gran variedad de estos instrumentos.

MOVIMIENTO BROWNIANO: el movimiento browniano es el movimiento aleatorio que se observa en algunas partículas nanoscópicas que se hallan en un medio fluido (por ejemplo, polen en una gota de agua). Recibe su nombre en honor a Robert Brown quien lo describe en 1827. En 1785, el mismo fenómeno había sido descrito por Jan Ingenhousz sobre partículas de carbón en alcohol. El movimiento

aleatorio de estas partículas se debe a que su superficie es bombardeada incesantemente por las moléculas del fluido sometidas a una agitación térmica. Este bombardeo a escala atómica no es siempre completamente uniforme y sufre variaciones estadísticas importantes. Así la presión ejercida sobre los lados puede variar ligeramente con el tiempo provocando el movimiento observado.

MOVIMIENTO DE CONVECCIÓN TÉRMICA: la convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, disminuyen su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

SEDIMENTACIÓN: la sedimentación de sólidos en líquidos está gobernada por la ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuando mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuando menor es la viscosidad del líquido. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras, proceso denominado coagulación y floculación.

SUPERFICIE EQUIPOTENCIAL: es el lugar geométrico de los puntos de un campo escalar en los cuales el potencial de campo es constante. Las superficies equipotenciales pueden calcularse empleando la ecuación de Poisson. El caso más sencillo puede ser el de un campo gravitatorio en el que hay una masa puntual: las superficies equipotenciales son esferas concéntricas alrededor de dicho punto. El trabajo realizado por esa masa siendo el potencial constante,

será pues, por definición, cero. En el caso del campo magnético generado por un conductor rectilíneo, las superficies equipotenciales serán cilindros concéntricos cuyo eje será precisamente el del conductor. Las curvas de nivel de estos cilindros son las que generan las líneas equipotenciales en el plano x-y.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL TRATADOR TÉRMICO-ELECTROSTÁTICO EN LA ISLA VI DEL CAMPO CANTAGALLO.*

AUTOR: OSWALDO MANCILLA HERNÁNDEZ.**

PALABRAS CLAVES: Estudio, Inventario, Análisis, Sección de Coalescencia

Este proyecto de grado consta del estudio del Sistema Eléctrico del Tratador Térmico Electrostático en la planta Deshidratadora de la isla VI del Campo Cantagallo en las instalaciones de ECOPETROL.

Para el estudio del Sistema Eléctrico del Tratador, se procedió en primera instancia con la recopilación de información de cada una de sus Secciones de Deshidratación del petróleo crudo. Con base en la información recopilada se realizó el inventario y el estudio de cada una de las Secciones, como son la Sección de Desgasificación, de Calentamiento, Diferencial y de Coalescencia en la anterior Sección se realizó un estudio teórico del rompimiento de agua emulsionada y Desalado por el Sistema de Coalescencia y del Sistema Electrostático.

Los resultados obtenidos servirán para mejorar el conocimiento del proceso y control de la Deshidratación o rompimiento del agua emulsionada en el petróleo crudo, con el fin de corregir cualquier eventualidad o deficiencia presentada durante su funcionamiento y donde se asegurará aumentar el cumplimiento de los parámetros de calidad en el contenido de agua, sedimentos (BSW), y el contenido de sal del crudo enviado a la refinería de la ciudad de Barrancabermeja.

Esfuerzos como éste, hacen contribuciones importantes al desarrollo tecnológico, operativo, administrativo, de infraestructura y económico de ECOPETROL y el progreso de nuestro país, además brindan seguridad a las personas y los equipos.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres. Codirector: Ing. Guido Bernier Montes.



ABSTRACT

TITLE: STUDY ABOUT THE TERMIC ELECTROSTATIC TRATADOR ELECTRIC SYSTEM IN THE VI ISLAND OF THE CAMPO CANTAGALLO.*

AUTHOR: OSWALDO MANCILLA HERNANDEZ**

KEYWORDS: Study, Inventories, Analysis, Coalescence's Section.

This project consists of survey about the Termic Electrostatic Tratador Electric System in the dehydration plant of facilities the VI Island of the Campo Cantagallo ECOPETROL.

To conduct the study about the Electrical System Tratador is in the first instance proceed with the collection of information from each section of dehydration of crude oil. Based on the information gathered will conduct its inventory and study of each section, such as the degasification's section, heating, differential and coalescence. In the preceding section will present a theoretical study about the emulsified water desalination by the system and coalescence of electrostatic system.

The results permits to improve knowledge about the process and dehydration control or breaking water in emulsified crude oil, in order to correct any eventuality or deficiency that can occur during its operation and increased compliance with the quality parameters contents in water, sediment (BSW), and the salt content of the crude shipped to the refinery in Barrancabermeja.

Efforts such as this will make important contributions to technological development, operational, administrative, infrastructure and economy of ECOPETROL and progress of our country, besides providing security to individuals and teams.

* Labor Grade.

** Faculty of Mechanical Engineering Physical. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: Dr. Hermann Raul Vargas Torres. Co-Director: Eng. Guido Bernier Montes.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de CONFIPETROL es ir en busca de su mejoramiento continuo en las diferentes áreas de la empresa, en la calidad de sus procesos y en el mejoramiento de sus conocimientos con el fin de lograr una mejor calidad en la información de sus integrantes, una de sus preocupaciones es conocer el sistema eléctrico del Tratador Térmico Electrostático encargado de la deshidratación y desalado del petróleo crudo ubicado en la planta deshidratadora de la isla VI del Campo Cantagallo en las instalaciones de ECOPETROL .

Esta propuesta enfatiza la caracterización de cada una de las diferentes secciones del proceso de deshidratación y desalado del petróleo crudo en el Tratador Térmico Electrostático y el comportamiento del aceite en cada una de estas secciones, con el fin de obtener el conocimiento de dicho Tratador por parte de la empresa.

En el presente trabajo de grado que tiene como modalidad práctica empresarial se contara con el estudio y análisis teórico de la parte eléctrica de la sección de coalescencia referente al Sistema de Potencia, Electrostático y el rompimiento de emulsión por parte de este.

El estudio de cada una de las secciones del Tratador Térmico Electrostático tendrá como objetivo el poder conocer el comportamiento del petróleo crudo en cada una de sus etapas de deshidratación y por ende rompimiento de emulsión.

1. GENERALIDADES

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general. Estudiar cada una de las secciones que conforman el Tratador Térmico Electrostático ubicado en la planta deshidratadora de la isla VI, del Campo Cantagallo en las instalaciones de ECOPETROL, enfocado principalmente en el sistema eléctrico, con el fin de conocer su funcionamiento y sus características de operación.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudiar el estado y comportamiento de los componentes y/o sistemas eléctricos presentes en cada una de las siguientes secciones:
 - Desgasificación.
 - Calentamiento.
 - Diferencial.
 - Coalescencia.

- Proponer las mejoras o cambios necesarios implementar según los resultados del primer objetivo.

1.2 ALCANCES Y RESULTADOS DEL PROYECTO

A la culminación del presente proyecto se contará con:

- Registro del esquema y funcionamiento en cada una de las secciones del proceso de deshidratación y rompimiento de emulsión del petróleo crudo en el

Tratador Térmico Electrostático.

- Caracterización de la sección de coalescencia compuesta de los siguientes sistemas:
 - Potencia.
 - Electrostático.
 - Control.

- Análisis teórico del rompimiento de emulsión por el sistema electrostático y del sistema electrostático como tal, aplicado al Tratador Térmico Electrostático bajo estudio

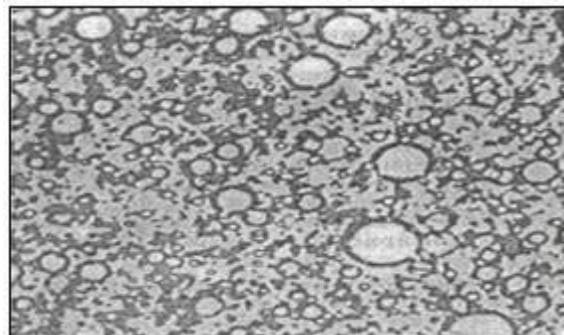
2. DESHIDRATACIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO²

La deshidratación del petróleo crudo consiste en el procedimiento de separación del agua asociada con el crudo, presentándose de forma emulsionada o libre, el fin de la deshidratación es lograr minimizar el contenido de agua en un porcentaje previamente especificado. Generalmente, este porcentaje es igual o inferior al 1% de agua de 100 ml de muestra de crudo tomada.

El crudo que viene directamente del pozo de extracción, es transportado y almacenado momentáneamente en grandes tanques y por acción de la gravedad el agua contenida en el crudo es separada por sedimentación, posicionándose en la parte inferior del tanque, esta agua es drenada y es depositada en una piscina de almacenamiento denominada piscina API (Instituto Americano de Petróleo).

Existe otra parte del agua que esta íntimamente combinada con el crudo en forma de emulsión que es agua/aceite (Se usaran las abreviaturas W (Waters) y O (oil) para dichas fases) W/O, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 1. Microfotografía de una emulsión agua en aceite.



² Salager J.L. Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las propiedades deseadas. Parte A: Introducción y conceptos de formulación fisicoquímica. Cuaderno FIRP 747-A, Universidad de los Andes, Mérida (1999).

La reducción del agua emulsionada no es de forma directa, debido a la estabilidad que presentan las gotas de agua emulsionada a la fuerza de gravedad.

El agua perteneciente a la emulsión le aporta al petróleo crudo un volumen adicional en el transporte de este y proporciona propiedades corrosivas, debido a la sal contenida en el crudo, el cual se ve reflejado en la reducción de la vida útil de los equipos utilizados en los diferentes procesos.

2.1 EMULSIÓN

Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está dispersada en la otra, donde las gotas internas son llamadas fase dispersa y la otra fase es denominado fase continua, y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante.

La noción de estabilidad es por supuesto relativa, pero se refiere a una casi ausencia de cambio durante un periodo de tiempo suficientemente largo para el propósito de la aplicación práctica, lo cual puede variar de algunos minutos a algunos años.

En ausencia de surfactante, una dispersión líquido-líquido coalesce rápidamente. En presencia de un agente emulsionante, la emulsión puede presentar una cierta segregación gravitacional pero la coalescencia de las gotas es notablemente retardada, a un cuando se tocan (ejemplo de la mayonesa).

Las cantidades relativas de fase dispersa y de fase continua (referidas también como fase interna y fase externa) influyen notablemente sobre las propiedades. Debajo del 20% de fase interna se habla de una emulsión de bajo contenido de fase interna.

En tales emulsiones se puede considerar que hay poca interacción de las gotas entre si, lo que permite modelizar ciertos comportamientos.

Al otro extremo están las emulsiones de alto contenido de fase interna, en las cuales las gotas de la fase interna ocupan más del 60-70% del volumen. En tales emulsiones las interacciones entre gotas dominan los efectos. Más allá del 75%, las gotas están literalmente al contacto y la emulsión se torna muy viscosa.

La concentración del agente emulsionante es variable, pero en la práctica existen dos límites. Debajo de una concentración mínima del orden de algunos miles de ppm (0,1% por ejemplo), no hay bastante emulsionante para estabilizar la emulsión. Más allá de algunos porcentajes (5% por ejemplo), no se gana nada aumentando la concentración del surfactante.

En las aplicaciones prácticas se encuentra una concentración de emulsionante en el rango 0,2 - 3%.

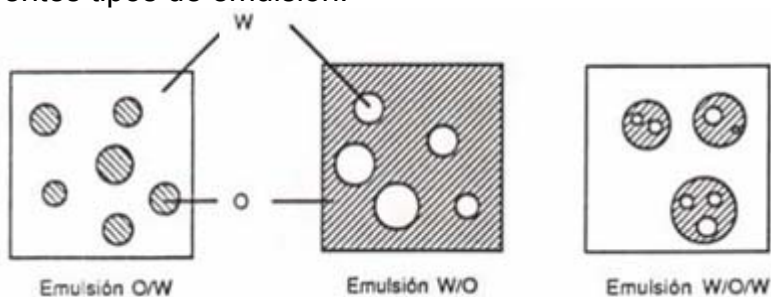
Por razones de eficiencia y de costo se usa en general un emulsionante compuesto de una mezcla de varios surfactantes.

2.1.1 Tipo de emulsión y distribución de tamaños. En la mayoría de los casos en los cuales se hace una emulsión con dos líquidos inmiscibles, uno de los líquidos es una fase acuosa y el otro una fase aceite u orgánica

Si la emulsión contiene gotas de aceite (O) dispersadas en agua (W), se le llamará emulsión O/W, la emulsión normal para todas la aplicaciones con excepción de la producción del petróleo, en la cual se denomina emulsión inversa.

Si la fase dispersada es el agua, se llama una emulsión W/O, emulsión normal para los petroleros, inversas para los demás (véase figura 2).

Figura 2. Diferentes tipos de emulsión.



Pueden existir casos más complejos. Por ejemplo, si las gotas de aceite de una emulsión O/W contienen en su interior gólicas de agua, se dice que se tiene una emulsión múltiple de tipo W/O/W (véase figura 2). Las emulsiones múltiples se encuentran en forma espontánea. Las emulsiones múltiples no pueden definirse con la concentración de ambas fases o por diseño en varias aplicaciones, particularmente en el campo cosmético o farmacéutico. Hay que especificar el contenido de fases interna en los dos tipos de gotas.

Volviendo a las emulsiones ordinarias se habla a veces de diámetro promedio de las gotas. Sin embargo las propiedades de la emulsión, en particular su viscosidad, no dependen solo del diámetro promedio y la única forma de describir la geometría de una emulsión es por su distribución de tamaño de gotas.

2.1.2 Producción de las emulsiones agua en petróleo. En la extracción del petróleo, la mezcla de petróleo crudo y agua se desplazan en un medio poroso a una velocidad del orden de 0,30 metros por día, por lo cual es insuficiente que se forme una emulsión. Pero debido a los equipos instalados para la producción durante el levantamiento y transporte en la superficie hacia la planta de deshidratación como son tubería, bombas, válvulas, codos, restricciones, etc. Se producen agitaciones y turbulencias suficientes para que el agua se disperse en el petróleo formando la emulsión agua en aceite W/O. Las emulsiones formadas son grandes, denominadas macro-emulsiones W/O con diámetros de gota que están entre 0.1 a 100 μm .

Para la formación de una emulsión tienen que existir:

- Dos líquidos inmiscibles, como ejemplo tenemos el agua y el aceite.
- Suficiente agitación para lograr dispersar uno de los líquidos en pequeñas gotas en el otro.

- Un agente emulsionante para estabilizar las gotas dispersas en la fase continúa.

Este agente emulsificante o tercera sustancia debe estar presente para estabilizar la emulsión. El tipo de emulsificador es un agente activo de superficie o surfactante.

Las moléculas del surfactante son anfipáticas, es decir, una parte de su molécula es hidrofílica o soluble en agua y la otra es lipofílica o soluble en aceite.

Los surfactantes estabilizan las emulsiones por migración a la interfase aceite-agua y forman una película interfacial alrededor de las gotas. Las moléculas de surfactantes se alinean ellas mismas en la interfase polar hidrofílica en la fase acuosa y en la no polar hidrofóbica en la fase aceite. Esta película estabiliza la emulsión debido a las siguientes causas:

- Reduce las fuerzas de tensión superficial que se requiere para la coalescencia de las gotas. Este decremento en la tensión superficial puede ser dramático. Añadiendo menos del 1 % de un surfactante puede reducir la tensión superficial de las gotas de aceite en agua de 30-35 mN/m.
- Forman una barrera viscosa que inhibe la coalescencia de las gotas. Este tipo de película ha sido comparada como una envoltura plástica.
- Si el surfactante es polar, alineado en la superficie de las gotas de agua, su carga eléctrica provoca que se repelan unas gotas con otras.

Un segundo mecanismo de estabilización ocurre cuando los emulsificadores son partículas sólidas muy finas. Para ser agentes emulsificantes, las partículas sólidas deben ser más pequeñas que las gotas suspendidas y deben ser humedecidos por el aceite y el agua. Luego estas finas partículas sólidas se

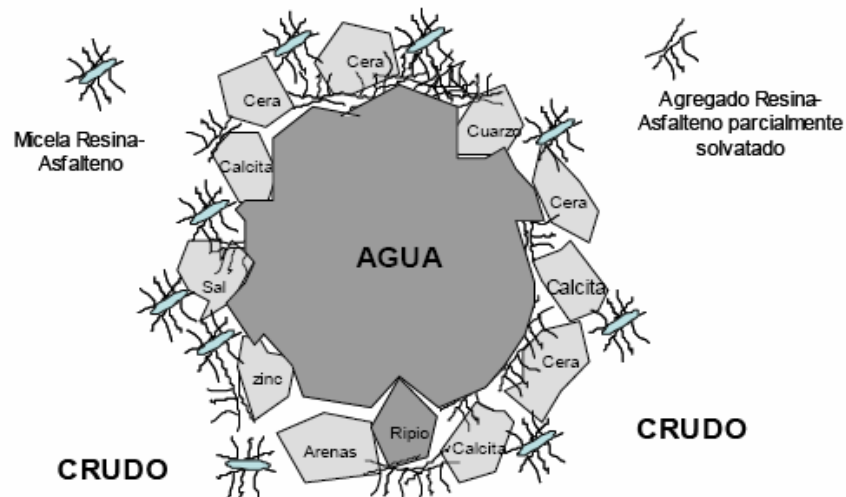
colectan en la superficie de la gota y forman una barrera física. Ejemplos comunes de este tipo de emulsificadores son el sulfuro de hierro y la arcilla.

En los pozos donde se extrae el crudo por levantamiento con gas, la emulsificación es producida principalmente en dos lugares: En el punto donde el gas es introducido y en la cabeza del pozo. En un proceso no continuo la emulsión generalmente es creada en la cabeza del pozo o en el equipo en superficie. En cuanto a la realización de un proceso continuo, la mayor parte de la emulsión es formada en el fondo del pozo, en el punto de inyección del gas.

En las emulsiones directas w/o, existe la fase acuosa dispersa que se refiere generalmente a agua y sedimentos (BSW) y la fase continua que es el petróleo crudo.

El BSW es principalmente agua salina sin embargo, sólidos tales como arena, lodos, carbonatos, productos de corrosión y sólidos precipitados o disueltos se encuentran también presentes, por lo que el BSW también es llamado Agua y Sedimento Básico (BSW).

Figura 3. Estabilización de una gota de agua por agentes emulsionantes.



Los agentes emulsificadores son numerosos y pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Compuestos naturales de superficie activa tales como asfáltenos y resinas conteniendo ácidos orgánicos y bases, ácidos nafténicos, ácidos carboxílicos, compuestos de sulfuro, fenoles, cresoles y otros surfactantes naturales de alto peso molecular.
- Sólidos finamente divididos, tales como arena, arcilla, finos de formación, esquistos, lodos de perforación, fluidos para estimulación, incrustaciones minerales, compuestos de corrosión (por ejemplo sulfuro de hierro, óxidos), parafinas, asfáltenos precipitados. Los fluidos para estimulación de pozos son notablemente efectivos para formar emulsiones muy estables.
- Químicos añadidos tales como inhibidores de corrosión, biocidas, limpiadores, surfactantes y agentes humectantes.

Las emulsiones directas se clasifican como emulsiones duras y suaves, una emulsión dura es muy estable y difícil de romper o separar, principalmente por que las gotas dispersas son muy pequeñas y una emulsión suave es inestable y fácil de romper. Es decir cuando un gran número de gotas de agua de gran diámetro están presentes, ellas frecuentemente se separan fácilmente por la fuerza gravitacional. El agua que se separa del crudo en menos de cinco minutos es llamada agua libre.

La cantidad de agua que queda emulsionada varía ampliamente desde 1 a 60% en volumen. En los crudos medianos y livianos las emulsiones contienen de 5 a 20 % de volumen de agua. Mientras que en los crudos pesados y extrapesados tienen un 10 a 35 % de agua. La cantidad de agua libre presente en el petróleo depende de la relación agua-aceite y su porcentaje varia de un pozo a otro. Cuando hacemos referencia a la palabra agua significa agua producida y es una salmuera que contiene cloruro de sodio y otras sales.

2.1.3 Prevenir la formación de la emulsión agua en petróleo. Las emulsiones se forman en el aparataje de producción del pozo y en las instalaciones de superficie debido al cizallamiento, por lo que se recomienda eliminar la turbulencia y remover el agua del aceite lo más pronto posible. Algunos recomiendan inyectar el surfactante o químico en el fondo del pozo para prevenir la formación de la emulsión. Las recomendaciones anteriores no siempre son posibles lograrlas, por lo que en muchos casos es necesario prepararse para el rompimiento de la emulsión inevitablemente formada.

La mejor forma de deshidratar es evitar que se produzca la emulsión o por lo menos reducir al máximo las condiciones que favorezcan la emulsión, a saber la producción conjunta de varios fluidos y la agitación.

En pozos fluyentes, una agitación considerable es generalmente causada por el gas disuelto saliendo de la solución conforme decrece la presión. Este gas también causa turbulencia cuando fluye junto con la mezcla difásica agua-aceite a través de accesorios y restricciones en la tubería de producción; pasa lo mismo cuando se utiliza el levantamiento con gas. Esta turbulencia puede ser reducida, pero no eliminada, instalando un estrangulador de fondo. Este estrangulador reduce la estabilidad de la emulsión por las siguientes causas:

- a) Hay menos presión diferencial a través de un estrangulador de fondo.
- b) La temperatura de fondo de pozo es considerablemente más alta que la temperatura en la superficie.
- c) Hay flujo laminar para una gran distancia corriente abajo del estrangulador de fondo y por lo tanto, menos turbulencia.

Los químicos usados en las fracturas de la formación, estimulaciones de pozos, inhibición de corrosión, etc., frecuentemente causan problemas de emulsión

muy severos, por lo que existen también métodos para romperlas, tales como el calentamiento, aditivos químicos, tratamiento electrostático y asentamiento.

En los casos de bajo contenido de agua (< 10%) resulta ventajoso añadir agua en el fondo del pozo antes que se produzca la emulsión porque así la emulsión formada será menos estable (el tamaño de gotas aumenta y se favorece la coalescencia).

3. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA DESHIDRATACIÓN DE CRUDO

3.1 SEPARADORES GRAVITACIONALES

Figura 4. Fotografía de un Eliminador de Agua Libre.



El asentamiento gravitacional se lleva a cabo en grandes recipientes de estructuras diferentes llamados: tanques, sedimentadores, tanques de lavado, “gun barrels” y eliminadores de agua libre. Los eliminadores de agua libre (EAL) son utilizados solamente para remover grandes cantidades de agua que es producida en la corriente, figura 4, pero que no está emulsionada y se asienta fácilmente en menos de 5-20 minutos. El crudo de salida de un EAL todavía contiene desde 1 hasta 30 % de agua emulsionada.

En el interior de estos recipientes que son de simple construcción y operación, se encuentran baffles para direccionar el flujo y platos de coalescencia. El agua es removida por la fuerza de gravedad y esta remoción provoca ahorros en el uso de combustible de los calentadores. Un calentador requiere de 350 Btu para calentar un barril de agua en 1°F, pero solamente requiere 150 Btu para calentar 1 barril de crudo en 1°F. El calentamiento de agua, aparte de que es un desperdicio de

energía provoca problemas de incrustación y requiere del uso adicional de tratamiento químico muy costoso para prevenir la incrustación.

Los eliminadores de agua libre (EAL), no son lo mejor ya que ellos solo remueven el agua libre. Están protegidos por ánodos de sacrificio y por aditivos para prevenir la corrosión por el efecto del agua de sal.

Otro sistema que es importante mencionar son los tanques de lavado o comúnmente llamados “Gun Barrels”. Estos recipientes usualmente operan con media parte de agua (colchón de agua) y la otra parte lo cubre el petróleo. Su funcionamiento consiste en que la emulsión entra al área de desgasificación, donde se produce la liberación del gas remanente a través del sistema de venteo.

Seguidamente, la fase líquida desciende por el tubo desgasificador y entra a la zona del agua de lavado a través de un distribuidor, que se encarga de esparcir la emulsión lo más finamente posible a fin de aumentar el área de contacto entre el agua de lavado y la emulsión, favoreciendo así la coalescencia de las partículas de agua. La emulsión fluye a través del agua en el interior del tanque de lavado siguiendo la trayectoria forzada por baffles internos que permiten incrementar el tiempo de residencia. El petróleo por ser más liviano que la emulsión asciende pasando a formar parte de la zona correspondiente al petróleo deshidratado.

Este proceso de deshidratación se ve afectado por altas velocidades de flujo, exceso de gas, descensos en la temperatura del fluido y recuperación de emulsiones envejecidas; por lo tanto, la eficiencia del mismo depende del control total de estas variables. Tienen un tiempo de residencia entre 3 a 36 horas. Entre los equipos más utilizados por la industria petrolera se mencionan los tanques de lavado de tipo helicoidal, los de tipo rasurado, concéntrico o araña³.

³ Salager J.L. Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las propiedades deseadas. Parte A: Introducción y conceptos de formulación fisicoquímica. Cuaderno FIRP 747-A, Universidad de los Andes, Mérida (1999).

3.2 CALENTADORES

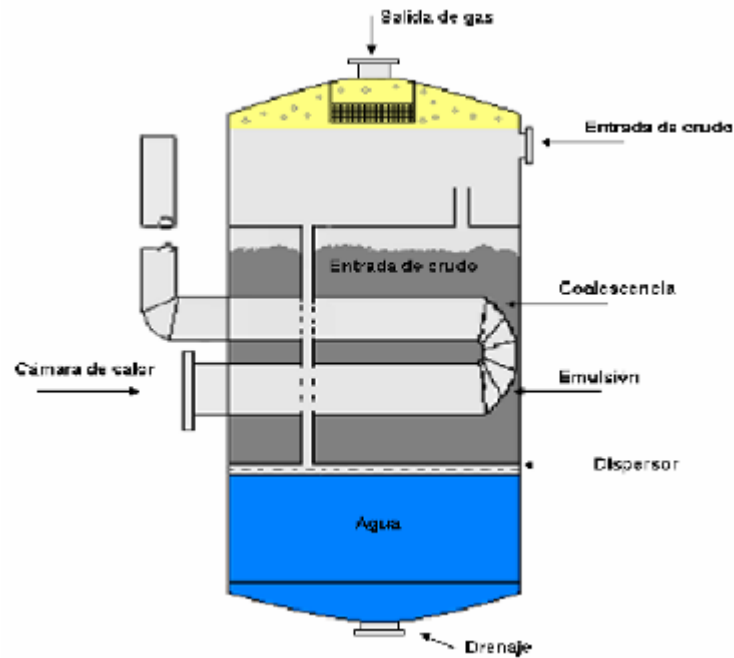
Figura 5. Fotografía de los calentadores de la planta deshidratadora



Los tratadores-calentadores pueden ser de tipo directo e indirecto en función de la forma en que se aplica el calor. En los calentadores de tipo directo el calor es transferido por contacto directo de la corriente alimentada con la superficie interna del calentador. Aunque este tipo presenta problemas de sedimentos y de corrosión pueden manejar mayores volúmenes de fluidos con menor gasto de combustible que los calentadores indirectos. Operan eficientemente en procesos de baja presión y donde los fluidos manejados no son muy corrosivos. Los más utilizados son los calentadores de fuego directo con cajas de fuego de tipo vertical, como se muestra en la figura 7.

En la planta deshidratadora del campo Cantagallo se cuenta con calentadores tipo horizontal (figura 6).

Figura 6. Calentador de crudo tipo vertical.

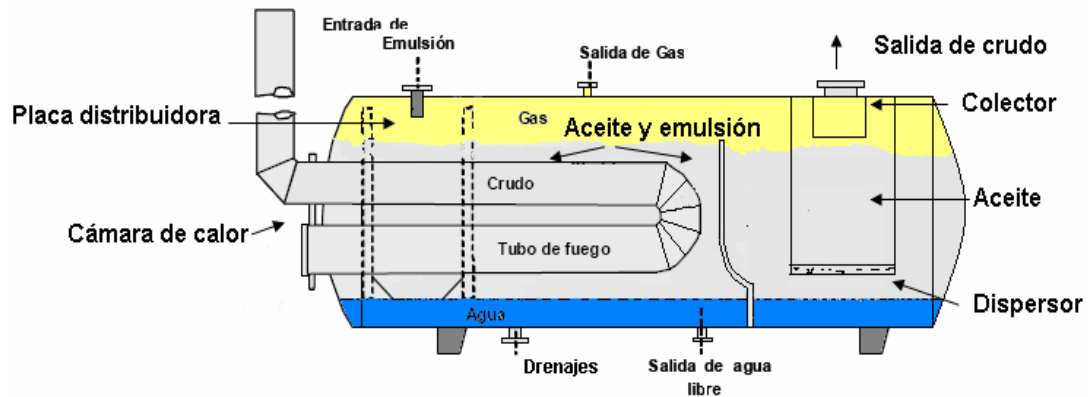


El diseño normal de un calentador tipo vertical cumple las siguientes funciones:

- Desgasificado de la emulsión de entrada.
- Remoción de arenas, sedimentos y agua libre previo al calentamiento.
- Lavado con agua y calentamiento de la emulsión.
- Coalescencia y asentamiento de las gotas de agua.

El crudo deshidratado caliente puede ser usado para precalentar la emulsión de entrada usando un intercambiador de calor. Los calentadores no son recomendables para remover grandes cantidades de agua libre.

Figura 7. Calentador de crudo tipo horizontal.



Las mismas funciones básicas son previstas en un calentador directo tipo horizontal (figura 8). La alimentación es parcialmente desgasificada, luego es direccionada hacia la parte de abajo del equipo para la separación del agua libre y la arena. Después, la alimentación es calentada y sufre una última desgasificación. Posteriormente, a través de un distribuidor pasa a un baño de agua para finalmente pasar a la sección de coalescencia

Las partículas sólidas, tales como arena, escama, productos de corrosión se depositarán en la parte inferior de estos equipos. Si estos sedimentos no son removidos puede causar los siguientes problemas:

- Acumularse y ocupar un volumen importante en el recipiente y eventualmente bloquear la corriente de alimentación.
- Bloquear la transferencia de calor, ocasionando finalmente el colapso del equipo de calentamiento.
- Interferir en los controles de nivel, ánodos, válvulas, medidores y bombas.
- Asimismo pueden incrementar el crecimiento bacteriano y la velocidad de

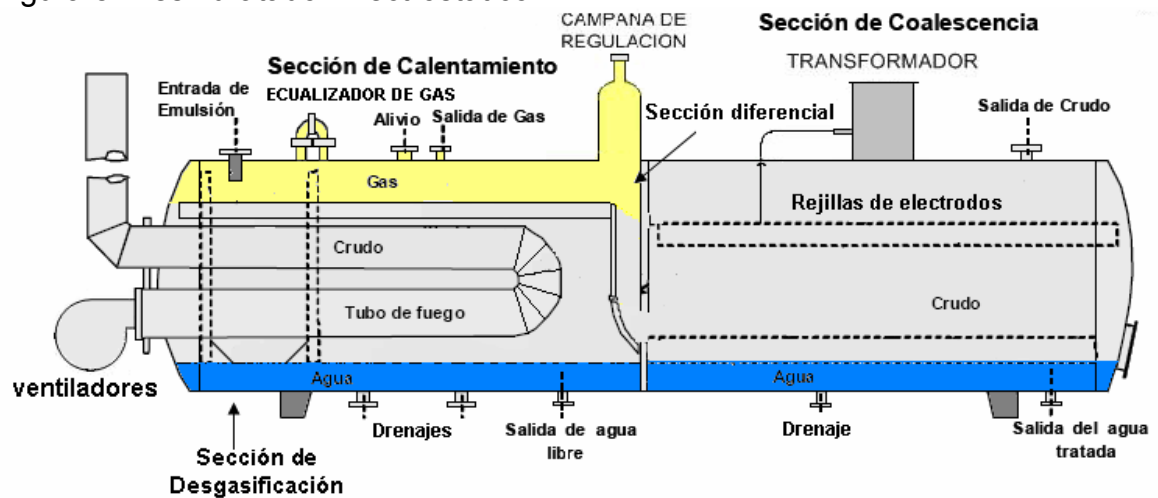
corrosión.

Para prevenir la deposición de estos sedimentos se pueden instalar “hidrojets” que operando a 30 psi por arriba de la presión de operación del calentador, removiendo los sedimentos para su posterior drenado por la parte inferior del recipiente. Otra alternativa es usar inhibidores de corrosión.

En los calentadores de tipo indirecto el proceso de transferencia de calor se efectúa mediante un baño de agua caliente, en el cual se encuentra sumergida la tubería que transporta la emulsión. Este tipo de calentadores disminuye el riesgo de explosión y son utilizados en instalaciones donde es posible recuperar calor, tales como el gas caliente de salida de las turbinas⁴.

3.3 COALESCEDORES ELECTROSTÁTICOS⁵

Figura 8. Deshidratador Electrostático.



⁴Salager J.L. Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las propiedades deseadas. Parte A: Introducción y conceptos de formulación fisicoquímica. Cuaderno FIRP 747-A, Universidad de los Andes, Mérida (1999).

⁵Guzmán C., Ramos L.R., Morataya C., Layrisse I. Criterios para el Diseño Conceptual de Procesos de Deshidratación/Desalación Electrostática. Revista Visión Tecnológica Vol. N° 3, 35-43 (1996).

Los procesos de deshidratación electrostática consisten en someter la emulsión a un campo eléctrico intenso, generado por la aplicación de un alto voltaje entre dos electrodos. Este dispositivo, generalmente tiene características similares a los de los equipos de separación mecánica presurizados, añadiendo a éstos el sistema de electrodos y de generación de alto voltaje. La aplicación del campo eléctrico sobre la emulsión induce a la formación de dipolos eléctricos en las gotas de agua, lo que origina una atracción entre ellas, incrementando su contacto y su posterior coalescencia. Como efecto final se obtiene un aumento del tamaño de las gotas, lo que permite la sedimentación por gravedad.

Entre las ventajas que posee los deshidratadores electrostáticos en comparación con los sistemas de tanques de lavado es que son menos afectados en su operación por las características de los crudos (densidad, viscosidad), agua o agentes emulsionantes, ofrecen mayor flexibilidad, el tiempo de residencia asociado es relativamente corto y por otra parte, son de menor dimensión. Además, con el tratamiento electrostático se obtiene una mejor calidad del agua separada y una mayor flexibilidad en cuanto a las fluctuaciones o variaciones en los volúmenes de producción.

Estos equipos se utilizan cuando la velocidad de asentamiento por gravedad es muy lenta, dada por la Ley de Stokes.

Como la molécula de agua es polar, el campo eléctrico incrementa la coalescencia de las gotas dispersas en el aceite por consiguiente los dos mecanismos que actúan simultáneamente son:

- Las gotas de agua adquieren una carga eléctrica neta.
- La distribución al azar de las gotas de agua en el interior del aceite al pasar por el campo electrostático se alinean con su carga positiva orientada al electrodo cargado (negativo).

Estas fuerzas de atracción electrostática pueden ser mucho más grandes que la fuerza de gravedad presente. La relación de fuerza electrostática con la fuerza de gravedad es de aproximadamente de 1.000 para gotas de agua de 4 micras de diámetro en crudo de 20° API expuesto a un gradiente eléctrico típico de 5 kilovoltios/pulgada.

4. DESALADO DEL CRUDO

Figura 9. Proceso de Deshidratación y Desalado



El proceso de desalado consiste en la separación de las pequeñas cantidades de sales minerales, que generalmente persisten disueltas en el agua remanente, mediante la adición de una corriente de agua fresca (con bajo contenido de sales) a la corriente de crudo deshidratado.

Consecutivamente, se efectúa la separación de las fases agua y crudo, mediante calentamiento, sedimentación y tratamiento electrostático, hasta alcanzar las especificaciones requeridas de contenido de agua y sales en el crudo.

Las sales minerales están presentes en el crudo en diversas formas: como cristales solubilizados en el agua emulsionada, productos de corrosión o incrustación insolubles en agua y compuestos órganos-metálicos como las porfirinas.

Posteriormente de la deshidratación o del rompimiento de la emulsión, el petróleo

crudo todavía contiene un pequeño porcentaje de agua remanente. Los procedimientos típicos anteriormente mencionados (adición de desmenuante, calentamiento, sedimentación y tratamiento electrostático) pueden reducir el porcentaje de agua del crudo a rangos de 0,2-1 % volumen.

La salinidad de la fase acuosa varía desde 100 ppm hasta la saturación, que es de 300.000 ppm (30 % peso); sin embargo lo usual es encontrar salmueras en el rango de 20.000-150.000 ppm (2 a 15 % de peso). Por comparación, el agua de mar contiene de 30.000-43.000 ppm (3 a 4,3 % de peso) de sales combinadas. El contenido de sal en el crudo normalmente es medido en libras de cloruro, expresado como cloruro de sodio equivalente por 1.000 barriles de crudo limpio, (Libras por Mil Barriles (LMB))⁶.

Cuando el crudo es procesado en las refinerías, la sal puede causar numerosos problemas operativos, tales como disminución de flujo, taponamiento, reducción de la transferencia de calor en los intercambiadores, taponamiento de los platos de las fraccionadoras. La salmuera es también muy corrosiva y representa una fuente de compuestos metálicos que puede envenenar los costosos catalizadores. Por lo tanto, las refinerías usualmente desalan el crudo de entrada entre 15 y 20 LMB para el caso de refinerías sencillas, en aquellas de conversión profunda las especificaciones pueden ser más exigentes, alcanzando valores de 1 LMB.

El desalado en campo reduce la corrosión corriente aguas abajo (bombeo, ductos, tanques de almacenamiento). Adicionalmente la salmuera producida puede ser adecuadamente tratada para que no cause los daños mencionados en los equipos y sea inyectada al yacimiento, resolviendo un problema ambiental. En ausencia de cristales de sal sólidos, el contenido de sal en el crudo deshidratado está directamente relacionado con el porcentaje de agua y con la concentración de salinidad de la fase acuosa (en ppm de NaCl).

El desalado se realiza después del proceso de rompimiento de la emulsión en

⁶Guzmán C., Ramos L.R., Morataya C., Layrisse I. Criterios para el Diseño Conceptual de Procesos de Deshidratación/Desalación Electrostática. Revista Visión Tecnológica Vol. N° 3, 35-43 (1996).

deshidratadores electrostáticos y consiste de los siguientes pasos:

- Adición de agua de dilución al crudo.
- Mezclado del agua de dilución con el crudo.
- Deshidratación (tratamiento de la emulsión) para separar el crudo y la salmuera diluida.

Como se muestra en la figura 10 el equipo convencional para el desalado incluye:

- Un equipo convencional de deshidratación (eliminador de agua libre, calentador o unidad electrostática).
- Una “tee” para inyectar el agua de dilución.
- Un mecanismo que mezcle adecuadamente el agua de dilución con el agua y las sales del crudo.
- Un segundo tratador (tipo electrostático o tratador-calentador) para separar nuevamente el crudo y la salmuera.

En base al desalado en una etapa, el requerimiento del agua de dilución es usualmente de 5 a 7 % con respecto a la corriente de crudo. Sin embargo, si el agua de dilución es escasa, el desalado en dos etapas reduce el requerimiento del agua de dilución a 1-2 % con respecto a la corriente del crudo.

5. ESTUDIO DEL TRATADOR TÉRMICO ELECTROSTÁTICO

Figura 10. Tratador Térmico Electrostático



El objetivo fundamental del Tratador Térmico-Electrostático es hacer parte de la deshidratación del petróleo crudo, proporcionando: la separación del gas, realizar la remoción de agua libre, y efectuar la coalescencia de las partículas de agua y sal atrapadas en el interior del aceite. De esta forma lograr que el crudo este en optimas condiciones y especificaciones para la refinería. Para poder lograr dicho propósito se debe contar con el mejor desempeño del equipo y que cuente con las especificaciones y los volúmenes de los fluidos que deben manejar los equipos dentro del rango de sus parámetros de diseño original.

Un deshidratador electrostático está dividido en 4 secciones. La primera ocupa aproximadamente el 15% de longitud y es llamada Sección de desgasificación, La

segunda sección ocupa aproximadamente el 35% de su longitud y es llamada “Sección de calentamiento”, La tercera sección es llamada “Sección central o control de nivel o Sección diferencial” y esta ocupa alrededor del 10% de su longitud ubicada adyacente a la sección de calentamiento. La cuarta sección ocupa el 40% de la longitud del deshidratador y es denominada Sección de coalescencia del agua suspendida para producir crudo limpio. Las parrillas de electrodos de alto voltaje están localizadas en la parte superior del recipiente, arriba de la interfase agua-aceite, en la sección de coalescencia.

Entre las desventajas que presentan los equipos de deshidratación electrostática están:

- Requerimiento de supervisión constante en su operación.
- Instalación de sistemas de control más sofisticados, lo que incide tanto en los costos de operación como de inversión.
- Instalación de sistemas de carga para un mayor control de flujo al equipo, ya que necesitan para su operación condiciones de flujo estables y controladas.
- Los dispositivos del equipo podrían ser afectados por los cambios en las propiedades conductoras de los fluidos de alimentación, cuando se incrementa el agua, la salinidad y la presencia de sólidos.
- El nivel de agua libre es controlado por dos medidores de nivel en paralelo y con diferentes principios de operación. Esta es la variable más difícil de manejar, ya que un valor alto podría hacer que el agua tenga contacto con las parrillas energizadas y exista un corto circuito en el equipo y sus correspondientes daños al sistema eléctrico.

Los tratadores electrostáticos son usados generalmente cuando existen las siguientes circunstancias:

- Cuando el gas combustible para calentar la emulsión no está disponible o es muy costoso.
- Cuando la pérdida de gravedad API o densidad es económicamente importante en la venta del crudo.
- Cuando grandes volúmenes de crudo deben ser tratados en una planta a través de un número mínimo de recipientes.
- Las ventajas del tratamiento electrostáticos son:
 - La emulsión puede ser rota a temperaturas muy por abajo que la que requieren los tratadores-calentadores.
 - Debido a que sus recipientes son mucho más pequeños que los calentadores, eliminadores de agua libre y gun-barrels, son ideales para plataformas petroleras marinas.
 - Pueden remover mayor cantidad de agua que otros tratadores.
 - Las bajas temperaturas de tratamiento provocan menores problemas de corrosión e incrustación.

5.1 LEVANTAMIENTO

5.1.1 Metodología utilizada. El levantamiento se inició con el estudio de la documentación actual del tratador en cuanto a su funcionamiento e infraestructura, posteriormente se realizó la inspección del tratador, donde se ubicaron cada uno de los equipos de instrumentación mecánicos y electrónicos, los equipos eléctricos y tablero de control.

Se procedió a identificar datos de placa de las diferentes válvulas, transductores, reguladores, transmisores, interruptores de nivel y presión, detectores de llama, electroválvulas, visores de nivel, manómetros, motores, transformador térmico y tablero de control.

Seguidamente se identificaron las diferentes líneas: tubería de petróleo crudo, gas, drenaje y agua contra incendios, se observó su procedencia y culminación de dichas líneas, cada uno de los diferentes calibres, colores de identificación respectivo al contenido en cada una de las líneas de tubería siendo plateado para petróleo crudo, naranja para gas, verde para drenaje y rojo para contra incendios.

Se observó el estado del sistema de potencia como es el transformador con su respectivo control, el sistema electrostático como es la posición de las placas, su calibre, material y conexión del sistema eléctrico a las respectivas placas o electrodos.

5.1.2 Estado actual del tratador térmico-electrostático

- **Dimensiones del Tratador Térmico Electroestático**
 - **Dimensiones y características de la vasija.**
 - Material de construcción = Acero S A - 516-70V

- Peso vacío = 32.205,05 kilogramos
- Espesor = 3/8 Pulgadas (1/4" de diseño y 1/8" de tolerancia a la corrosión)
- Diámetro interno = 3,05 m
- Capacidad interna = 540 Barriles
- Longitud total = 12,19 m
- Longitud del casco, (sin incluir las tapas) = 10,67 m
- Longitud de las cabezas elípticas = 0.254 m

- **Dimensiones de los tubos de fuego y chimenea**
 - Diámetro de los tubos de fuego = 24,00 pulgadas
 - Longitud de los tubos de fuego = 4,57 m
 - Espesor de los tubos de fuego = 1/8 Pulgadas
 - Altura de las chimeneas = 10,67 m

- **Dimensiones de las líneas de tubería**
 - Diámetro de la Línea de entrada de petróleo crudo= 6,00 pulgadas
 - Diámetro de la Línea de salida de petróleo crudo = 6,00 pulgadas
 - Diámetro de la Línea de salida de gas = 2,00 pulgadas
 - Diámetro de la Línea de drenaje de agua de calentamiento = 3,0 pulgadas
 - Diámetro de la línea de drenaje de agua de coalescencia = 3,0 pulgadas

- **Presión, Temperatura y Capacidad de Diseño**
 - Presión de operación = 20 Psi. @ 160,00 °F
 - Presión de diseño = 75 Psi. @ 225,00 °F
 - Temperatura de operación = 160,00 °F
 - Temperatura de diseño = 250,00 °F
 - Capacidad de diseño: Flujo de aceite = 20000 BPD, Flujo de agua
 - 4500 BPD, Flujo de Total = 24500 BPD

- **Quemadores**

- Referencia: North American Mfg Co. Modelo 5131 B-6.
- Combustible: gas natural.
- Capacidad nominal: 6.3 mm. BTU /HR.
- Consumo de combustible: 6300 pies cúbicos por hora de gas.
- Tamaño de la llama: 3 pies de diámetro por 7 pies de longitud.
- Suministro de energía: 111/220 v, 60 Hz.

- **Panel de control del quemador**

- Interruptor de presión de aire de automatización, Honeywell.
- Interruptor de presión del quemador “on-off”, Honeywell.
- Interruptor de presión de modulación del quemador, Honeywell.
- Amplificador de señal de falla de la llama en el quemador, Honeywell.
- Programador de secuencia del quemador, Honeywell.
- Potenciómetro de control de la rata de quemado.
- Interruptor de purga- manual-auto.

5.1.3 Instrumentación. La información se registro en una lista con cada uno de los elementos que componen el Tratador Térmico-Electrostático con sus respectivos datos de identificación.

- Instrumentación de nivel

Tabla 1. Componentes del sistema de medición de nivel.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y COMPONENTES	MARCA	MODELO	FUNCIÓN	UBICACIÓN
1	Válvula de control tipo bola de 1 1/2" con Posicionador	Fisher	1052/V100	Control del nivel de drenaje	Sección de Coalescencia
1	Transductor	Foxboro	E69F-T12	Convertir la señal de corriente a presión (I/P)	Sección de Coalescencia
1	Regulador	Fisher	67CFR-225	Regular el nivel de gas al transductor	Sección de Coalescencia
1	Válvula de control tipo bola de 1 1/2" con Posicionador	Fisher	1052/V100	Control del nivel de drenaje	Sección de Calentamiento
1	Transductor	Foxboro	E69F-T12	Convertir la señal de corriente a presión (I/P)	Sección de Calentamiento
1	Regulador	Fisher	67CFR-225	Regular el nivel de gas al transductor	Sección de Calentamiento
1	Válvula de control tipo mariposa de 4" con Posicionador	Fisher	1052/8550	Controla la presión del petróleo de salida	Sección de Coalescencia
1	Transductor	Foxboro	E69F-B12-M	Convertir la señal de corriente a presión (I/P)	Sección de Coalescencia
1	Regulador	Fisher	67CFR-225	Regular el nivel de gas al transductor	Sección de Coalescencia
1	Transmisor de nivel de interfase tipo radar	Rosemount	3301HA	Transmite la variable censada	Sección de Calentamiento
1	Transmisor de nivel de interfase tipo radar	Rosemount	3301HA	Transmite la variable censada	Sección de Coalescencia
1	Transmisor de nivel de crudo tipo radar	Drexelbrock		Transmite la variable censada	Sección Diferencial
1	Interruptor de nivel	Pepperl + Fuchs	LVL-MI-N21AA	Transmite la variable censada	Sección Diferencial
1	Visor de nivel tipo columna con válvulas tipo 147	Jerguson	20-T-12	Para observar el nivel de aceite	Sección de Coalescencia
1	Visores de nivel de columna con válvulas tipo 147	Jerguson	20-T-12	Para observar el nivel de aceite	Sección de Calentamiento

• **Instrumentación de presión**

Tabla 2. Componentes del sistema de medición de presión.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y COMPONENTES	MARCA	MODELO	FUNCIÓN	UBICACIÓN
1	Válvula de control tipo bola de 2"	Fisher	40079M	Control del nivel de gas	Sección de Calentamiento
1	Posicionador con Transductor	Fisher	13544320	Reposiciona el nivel de presión en la válvula y convierte la señal de corriente a presión	Sección de Calentamiento
1	Válvula de control tipo bola de 1"	Fisher	15027346	Control de gas de entrada en la campana de regulación	Sección de Calentamiento
1	Regulador	Fisher	67CFR-225	Regular el nivel de gas al transductor	Sección de Calentamiento
1	Posicionador	Fisher	13703985	Reposiciona el nivel de presión en la válvula	Sección de Calentamiento
1	Regulador	American Meter Company		Regular el gas a los pilotos	Sección de Desgasificación
1	Regulador	American Meter Company	1813B	Regulación de gas	Sección de Desgasificación
1	Transmisor de presión	Rosemount	3051S2	Transmite la variable censada	Sección de Calentamiento
4	Electroválvula	ASCO	AH2B112A4	Controla que sea la presión establecida	Sección de Desgasificación
2	Válvula solenoide	ASCO	De 11/4"	Alivio de las electroválvulas	Sección de Desgasificación
2	Válvula solenoide	Electrogas	Clase A, Grupo 2	Permite o interrumpe el flujo de gas a la sección de desgasificación en coordinación con el detector de llama	Sección de Desgasificación
2	Interruptor de presión	Honeywell	C437	Controla que la presión del gas se mantenga en lo establecido para los quemadores de gas	Sección de Desgasificación
2	Válvula de seguridad de 4"-300# x 6"-150#	Teledinet-Farrys	26PA10-120	En caso de alta presión no controlada se habrá para evitar una explosión en el TTE	Sección de Calentamiento

- **Instrumentación de temperatura**

Tabla 3. Componentes del sistema de medición de temperatura.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y COMPONENTES	MARCA	MODELO	FUNCIÓN	UBICACIÓN
2	Transmisores de Temperatura con sensor de temperatura tipo RTD e indicador local (redundantes).	Rosemount	644HA	Transmite la variable censada	Sección de Calentamiento
2	Detector de llama ultravioleta de estado sólido	Honeywell	C7012	Detecta la radiación ultravioleta producida por la combustión de gas, petróleo, carbón u otros combustibles.	Sección de Desgasificación

- **Datos de placa del Transformador térmico**

Tabla 4. Datos de placa del transformador térmico del TTE.

TRANSFORMADOR TÉRMICO	
Potencia [KVA]	50
Tensión de entrada [V]	480
Tensión de salida [KV]	16.5-23
Corriente de entrada AC [A]	87
Frecuencia de entrada [Hz]	60
Tipo de conexión	Monofásico

El transformador esta instalado en la zona de coalescencia del Tratador Térmico-Electrostático, es alimentado con una tensión de 480 V en señal alterna y a su salida puede alimentar la carga ya sea con una señal alterna o continua, con una salida que está entre 16.5 a 23 Kilovoltios, alimentando las placas metálicas encargadas de realizar el efecto electrostático.

- **Datos de placa de los Motores de ventilación**

Tabla 5. Datos de placa de los motores de la Sección de Desgasificación.

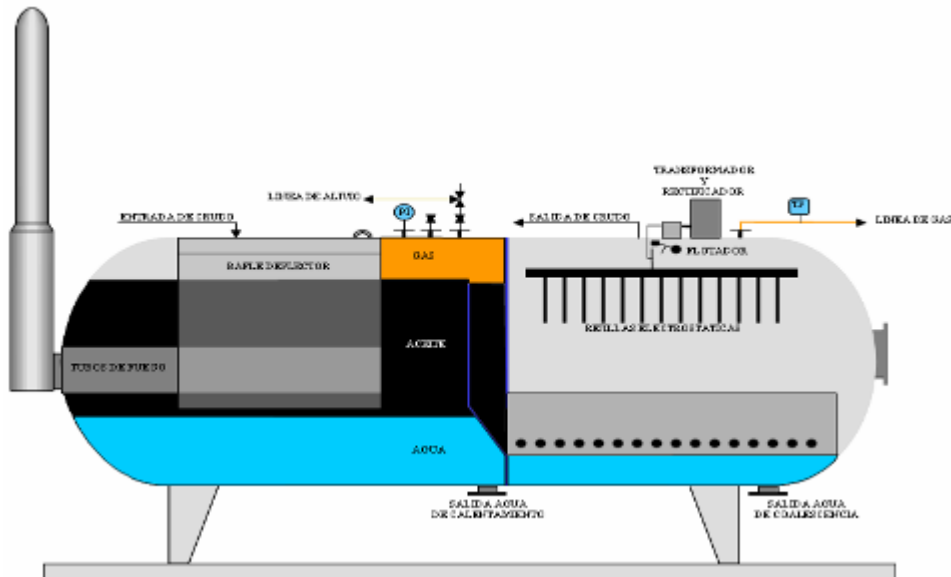
MORTOR 1 Y 2		
SIEMENS	3~Motor 1LA7M 1/2-2YAGO	
	5.0/3.7 HP/KW	F.5 1,15
	Form const. IMB3	S1
	220YY-440Y V	CL.AISL.F
IEC 34	16.0-8.0 A	60 Hz
	Cosφ: 0.86	3480 rpm

Los motores 1 y 2 se encuentran en la zona de desgasificación del Tratador

Los motores 1 y 2 se encuentran en la sección de desgasificación del Tratador Térmico-Electrostático, tienen la función de dar la ventilación de aire junto con las aspas adheridas a cada uno de estos motores que en conjunto son llamados ventiladores. Esta ventilación tiene como objetivo aumentar la llama y que esta sea difundida a través de los tubos de fuego para el debido calentamiento del petróleo crudo.

5.2 SISTEMA DE CONTROL

Figura 11. Distribución del agua, gas y crudo en el TTE.



5.2.1 Control de interfase. El nivel de interfase aceite-agua en la sección de calentamiento se mantiene mediante un regulador de nivel que acciona una válvula de control de flujo de agua hacia la línea colectora de aguas aceitosas producidas en la estación.

Este sistema consta en primer lugar de una sonda tipo capacitivo que actúa como medidor de nivel de interfase, dependiendo de la conductividad eléctrica que se presente debido al nivel de agua. Esta señal es censada por un transmisor de nivel que la envía entonces al controlador indicador ubicado en el cuarto de control. Allí la señal es comparada con el punto fijo o “set point”, en donde se requiere que se mantenga el nivel, enviando una señal eléctrica para la válvula de control abre o cierre dependiendo de si el nivel es mayor o menor del valor preestablecido por el “set point”. Esta señal eléctrica es recibida por un transductor que la convierte en señal neumática para accionar la válvula de control.

El nivel de la interfase aceite-gas en la sección de calentamiento y de agua-aceite en la sección de coalescencia se controla de forma semejante mediante las respectivas sondas de nivel, transmisores, controladores, indicadores, traductores y válvulas de control.

Las secciones de calentamiento y de coalescencia se incluyen dos alarmas visuales dentro del cuarto de control para indicar la existencia de alto o bajo nivel de interfase en estas secciones. La sección de calentamiento presenta dos interruptores de alto y bajo nivel crítico que abren o cierran respectivamente la válvula de control en caso de que el nivel de aceite en esta parte del Tratador Térmico-Electrostático este en alguno de los límites. Además se tienen alarmas visuales en el cuarto de control de nivel de fluido alto, alto crítico, bajo y bajo crítico.

La sección de calentamiento posee un interruptor de nivel de aceite bajo crítico, con su respectiva alarma visual en el cuarto de control, que se activa cuando la interfase gas-aceite desciende hasta el nivel del interruptor, apagando los quemadores y cerrando la válvula de control de calentamiento. De esta forma protege al tratador de calentar el gas, lo cual podría ocasionar altas presiones en la vasija y condiciones de operación peligrosa.

5.2.2 Control de temperatura. La temperatura de tratamiento del crudo en el Tratador Térmico-Electrostático esta controlado por un regulador indicador de temperatura, que recibe la señal enviada por el medidor de temperatura en el Tratador Térmico-Electrostático, y la compara con el punto fijo preseleccionado o máxima temperatura de tratamiento que son 170°F, para permitir o no el paso de gas hacia los quemadores. Mientras la temperatura se mantenga por debajo del “set point”, la válvula de control de gas a los quemadores se mantiene abierta para incrementar la temperatura límite, la válvula de control cierra, permaneciendo encendido únicamente el piloto de los quemadores.

El sistema de control de temperatura posee además dos alarmas visuales en el

cuarto de control para indicar los casos en que se presentan baja o alta temperatura de tratamiento.

5.2.3 Control de presión. La diferencia de presión existente entre el separador general de gas y el Tratador Térmico-Electrostático hace que se desprenda una determinada cantidad de gas en el interior del Tratador, cuando la corriente de entrada llega a su interior. Este gas es utilizado para mantener la presión interna de operación en el Tratador Térmico-Electrostático, necesaria para obtener un adecuado flujo de aceite hacia los tanques de almacenamiento. El gas remanente pasa al depurador-acumulador-trampa mediante una válvula de control accionada por un controlador indicador de presión. Este controlador indicador determina la apertura o cierre de la válvula de control al comparar la señal que recibe del transmisor de nivel en el Tratador Térmico-Electrostático, con el punto fijo que corresponde a la presión de operación. Existen además dos alarmas visuales en el cuarto de control de alta y baja presión del Tratador.

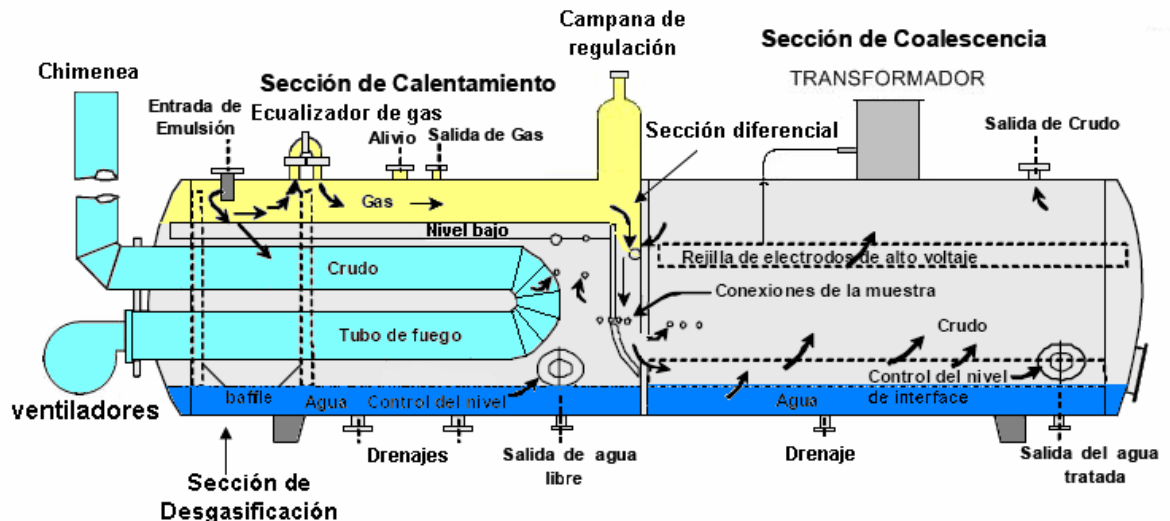
5.2.4 Sistema desarenador. El Tratador Térmico-Electrostático posee un sistema de desarenamiento para remover periódicamente los sedimentos que allí se depositan. El proceso de desarenamiento consiste en inyectar al Tratador Térmico-Electrostático agua a presión mediante una bomba a través de siete flautas ubicadas en la parte inferior y a lo largo del Tratador Térmico-Electrostático.

Cada una de estas flautas es alimentada mediante una válvula inyectora. El agua se descarga a alta velocidad a través de una serie de boquillas, hacia el fondo del tratador en donde se mezclan con los sedimentos depositados convirtiéndolos en lodo. Este material fluidizado es evacuado luego mediante siete válvulas desarenadoras por la línea de desarenar hacia la piscina API. El sistema desarenador del tratador trabaja en forma automática mediante un temporizador y un programador que accionan la bomba, que abren y cierran secuencialmente las

válvulas inyectoras y desarenadoras un determinado numero de veces al día, dependiendo del intervalo deseado entre operaciones de desarenamiento. Cuando el sistema desarenador no trabaja en forma automática, es necesario abrir y cerrar manualmente las válvulas inyectoras y desarenadoras. El tiempo de apertura promedio para las válvulas inyectoras es de 40 a 60 segundos y el de las desarenadoras es de 10 a 20 segundos, siendo mayores en la sección de calentamiento.

6. ESTUDIO DE LAS SECCIONES QUE CONFORMAN EL TRATADOR TÉRMICO ELECTROSTÁTICO

Figura 12. Partes y flujo interno del Tratador Térmico- Electrostático.



El Tratador Térmico Electrostático cuenta con los siguientes datos o variables de funcionamiento que se deben tener en cuenta en cada una de sus secciones que lo conforman y en el equipo como tal, las cuales son:

- **Cantidad de crudo que entra al TTE:** En el Tratador actualmente están entrando un promedio de 13000 barriles de aceite por día con posibilidad de seguir aumentando.
- **Cantidad de agua que entra al TTE unida al crudo:** A la entrada de los calentadores llegan aproximadamente entre 3200 y 3700 barriles de agua por día, en ciertas ocasiones los calentadores no desalojan agua y esta pasa al Tratador, cuando funcionan adecuadamente se puede retirar 1000 - 2000 barriles de agua y entran al Tratador entre 2000 y 2500 barriles por día.

- **Niveles de agua en cada sección del TTE:** Del Tratador el crudo sale con aproximadamente 2 a 4 % de agua, lo cual implica que se ha desalojado alrededor de 1900 a 2400 barriles de agua por día.
- **Condiciones de operación. Niveles, Temperatura, Presión, etc., en todas las etapas:** la temperatura de entrada al Tratador es de aproximadamente 140°F y sale a aproximadamente 165°F, debe operar lleno en la fase de calentamiento, con un nivel del 50% en la sección diferencial o comúnmente llamada bolsillo y lleno en la fase de coalescencia (zona electrostática), en la etapa intermedia (campana de gas) se maneja entre 19.5 y 20 psi.
- **Condiciones que presenta el crudo que entra al TTE, como BSW, sal, sedimentos:** El crudo entra al Tratador con las condiciones mencionadas, generalmente no presenta sedimentos y tiene una concentración de sal entre 250 y 550 PTB (libras por cada mil barriles).
- **En que afecta el proceso del TTE, con la entrada de pozos PCP y BES:** En Cantagallo no se cuentan con pozos PCP, cuando se cuenta con bombas electrosumergibles (bombas centrifugas), se tiene el problema de formación de emulsiones desde el yacimiento, lo cual perjudica el proceso o lo hace más difícil, requiriéndose un mejor tratamiento y/o mayor tiempo de retención o una mezcla de ambos.
- **Cantidad de químico que le inyectan al crudo:** Actualmente en todo el proceso se esta inyectando la cantidad necesaria para lograr la deshidratación del crudo (entre 40 y 60 ppm)
- **Tiempo de permanencia mínimo del crudo en el tratador:** La capacidad de crudo del Tratador es de 540 barriles, y tiene un tiempo de permanencia de 1 hora,

el tiempo actual es suficiente cuando no se presentan inconvenientes, pero como siempre se tienen contingencias en la instrumentación del Tratador, o en el fluido a tratar.

6.1 EL TRATADOR TÉRMICO ELECTROSTÁTICO ESTA CONFORMADO POR LAS SIGUIENTES SECCIONES.

- Desgasificación.
- Calentamiento.
- Diferencial.
- Coalescencia.

Cada una de las anteriores secciones que conforman el Tratador serán explicadas y caracterizadas a continuación:

6.1.1 Sección de Desgasificación. La sección de desgasificación esta separada de la sección de calentamiento mediante baffles o pantallas fijas. El fluido se precipita por el área de desgasificación e ingresa a la sección de calentamiento.

- **Proceso de funcionamiento de la Sección de Desgasificación.**

Unidades de encendido de gas o pilotos: Esta unidad llamada piloto de encendido origina su trabajo durante el ciclo de encendido, cuando el programador llega a la etapa de combustión envía una señal y energiza un pequeño transformador el cual origina un arco eléctrico entre la punta del electrodo y la barra de la chispa. Paralelamente se abren las válvulas solenoides de línea de gas de ½” permitiendo el flujo de gas que se dirige hacia el mezclador donde se mezcla el gas con el aire proveniente a través de la tubería de ½” desde el ventilador de tiro forzado. Esta mezcla pasa a través del tubo Ignitor y es prendida por el arco eléctrico. Esta mezcla se dosifica y de esto esta encargada la válvula

ubicada en la línea de aire que entra a la tee venturi. Este aire se denomina aire primario de encendido.

El aire secundario del mismo ventilador que viene por el tubo de $\frac{3}{4}$ " que se regula a través de la otra válvula y tiene como función servir para la combustión y calidad de la llama del piloto.

En el extremo del tubo de mezcla existe una placa deflectora, la cual cumple la función de evitar que la llama del piloto se forme lejos.

Una vez calibrado el sistema de aire-gas del piloto no debe modificarse, no moverse las válvulas, ni la posición del electrodo, por que se puede descalibrar y hacer difícil el encendido del piloto y por ende se dificulte la detección de la llama por parte de la foto-celda para que esta envíe la señal al programador y este a su vez ordene la apertura de las válvulas motorizadas principales de gas y así iniciar el ciclo de trabajo continuo del quemador.

- **Partes que conforman el piloto de encendido.**

Figura 13. Sección de Desgasificación



- **Válvula de bola de ½”:** Tiene como función impedir el paso del gas, cuando esta se encuentra cerrada. Cuando se vaya a operar el quemador esta válvula debe abrirse y permanecer abierta mientras este funcionando el quemador.

- **Regulador de gas American Meter de ¾” modelo 1213B2-180°:** Es un regulador de presión que esta diseñado para aplicaciones de gas natural de fácil instalación de orificios intercambiables y también de resortes intercambiables que existen entre 3.5” columna de agua y 5 psi. El rango de la temperatura de operación es de -30° a 65°C.

La caja del diagrama es de fácil remoción para hacer una inspección de rutina sin hacer desmonte del regulador de la tubería.

Regulación: El proceso de regulación se hace a través del sistema lateral que tiene el regulador. Para ello se quita la tapa superior que está en la caja que protege el diafragma y medida que se va girando la tuerca en el sentido de las manecillas del reloj, la presión aumenta hasta la presión máxima la cual define el tipo de resorte que tiene. Cuando se gira en sentido contrario a las manecillas del reloj se disminuye la presión de operación.

- **Manómetro de columna de agua:** Tiene como función dar a conocer la presión de salida del regulador. se definió una presión entre 16 y 20” de columna de agua para la operación del piloto de gas.

- **Válvula de ¼”:** Ubicada en posición vertical tiene como función cuando se cierra impedir el paso de gas hacia el manómetro cuando se requiere hacer alguna revisión del mismo.

- **Válvula de ¼” ubicada en la posición lateral:** Para su operación debe quitarse primero el tapón hembra que esta a la salida. Tiene como finalidad dos funciones, realizar purga de gas y cuando se requiere desmontar el manómetro

antes de quitarlo debe despresurizarse la línea y es a través de ello que se puede hacer. Una vez realizada cualquiera de las dos funciones o ambas debe instalarse el tapón hembra.

- **Válvulas solenoides Electrogas Honeywell de 1/2”:** Es una válvula automática para gas de abertura y cierre rápido tipo VMR segura, normalmente cerrada. En condiciones de reposo, el muelle actúa sobre la chapeta de la válvula impidiendo así cerrada, el paso de gas. Cuando se alimenta la bobina, la válvula se abre. Cuando la corriente de alimentación se corta, la válvula se cierra instantáneamente. Este tipo de dispositivo se emplea en maniobras de corte y de distribución de gas, y es indicado para un servicio continuo, el cual es regulable de 0 m³ /h hasta el valor máximo indicado en la placa.

Después de quitar el capuchón de fijación de la bobina, girar el tornillo de ajuste, situado bajo el tornillo sin cabeza de bloqueo. Se aconseja realizar el ajuste del caudal con el quemador en funcionamiento y después de realizarse el ajuste, apretar el tornillo sin la cabeza de bloqueo. No hay que hacer reglajes por debajo del 40% del caudal, ya que podría provocar turbulencias.

- **Sistema de suministro de aire:** El aire se requiere dentro del quemador para permitir que se lleve a cabo la combustión y también para impulsar los gases de la combustión a través de la cámara.

El aire entra por medio de un ventilador centrífugo, se realiza la combustión y se impulsan los gases. Este medio cuenta con un sistema de control llamado Damper que regula la entrada de aire para fiscalizar que la combustión sea apropiada.

- **Control de presión de aire:** Son controles lo suficientemente sensibles para controlar bajas presiones de aire producidas por ventilador. Sirve de interlock en el control de la combustión.

Es un presostato pequeño que tiene una membrana de caucho. Tiene contactos

normalmente abiertos.

Cuando hay flujo de aire dentro del ducto que conduce el aire proveniente del ventilador, la membrana de caucho es empujada contra el micro-switch. Cambiándose con esta acción la posición de los contactos del micro-switch a la posición de cerrados y permitiendo así que el programador siga la secuencia de encendido del quemador. Si durante el funcionamiento por cualquier circunstancia el control regresa a sus condiciones iniciales (posición normalmente abierta) se detiene la operación de quemador. El programador o control de llama no opera mientras no se compruebe que hay flujo de aire en el quemador.

Es sistema de aire hacia el piloto de encendido esta conformado por una tubería que sale directamente de la carcasa que contiene el rotor o ventilador y de allí sale a través de una tubería de $\frac{3}{4}$ " y llega hasta una tee de $\frac{3}{4}$ " y de allí se bifurca en dos ramales.

Uno de ellos va hacia la tee venturi donde este aire es combinado con el gas y se hace la mezcla que va hacia la unidad de encendido en donde el encontrar el arco eléctrico se produce la llama y se produce lo que llamamos el encendido del piloto. El otro ramal es el llamamos aire secundario del piloto y se usa para la combustión y calidad de la llama del piloto. Este aire se regula con la válvula localizada a la salida del mismo.

El tee venturi es un elemento conformado por dos secciones que se pueden desenroscar, una de ellas tiene la forma de un cono y por su orificio entra el aire en forma vertical y se dirige hacia la cámara de mezcla. Por la parte lateral de la tee venturi entra el gas proveniente de la red del piloto, continua hacia la cámara de mezcla aire-gas y de allí pasa hacia el quemador piloto en donde se produce la combustión, una vez se produzca al arco eléctrico producido por el transformador de ignición a través de electrodo y de la barra de chispa.

- **Unidades de encendido de gas:** Este conjunto esta conformado por el cuerpo propiamente dicho, el cual contiene el electrodo, la barra de la chispa y la placa

deflectora que cumple la función de evitar que la flama del piloto se forme lejos de esta.

- **Transformador de ignición:** De 110-10.000 volts. Genera el voltaje de 10 kv para producir el arco eléctrico con el cual se produce el encendido del gas.

- **Sistema de conducción de los gases de combustión:** La expulsión de los gases de combustión es de tiro forzado el cual cuenta con un ventilador que obliga a los gases a desplazarse a través de la cámara de combustión y salir por la chimenea hacia la atmosfera.

- **Termómetro de chimenea:** Este termómetro es un termómetro bimetálico para salida de los gases de la chimenea, la escala esta entre 93,33°C a 537,78 °C, con un vástago de 6" se recomienda una escala minima de 6" por razón de la altura, para tener la mejor visualización.
Su función es determinar la temperatura de los gases de salida de la cámara de combustión, comprobar que esta operando adecuadamente y con las menos perdidas de eficiencia posibles.

- **Quemador:** Es el encargado de realizar la combustión por medio de la inyección del gas-aire y la formación de la chispa para quemarlo.

- **Ventilador:** Para que el combustible se queme se requiere aire que es proporcionado por este dispositivo, que es girado por un motor marca Siemens de 5 HP a 3600 rpm.

- **Control de llama:** Marca Honeywell ref. 7840L. Comanda y controla la operación del quemador enciende y apaga el quemador en función de la demanda de temperatura, coordina la operación del ventilador de combustible, controlando a

través del modutrol Honeywell que mueve el fuego de palancas que abre o cierra los damper ya sea del aire y/o del combustible según la demanda requerida.

- **Purga o barrido de los gases de combustión:** Cuando se va a iniciar la operación del quemador propiamente dicho, el ventilador debe funcionar individualmente durante un corto periodo de tiempo, a fin de realizar el barrido de gases existentes dentro de la cámara de combustión esto se conoce como prepurga o prebarrido. Posteriormente cuando se finaliza la operación del quemador de nuevo el ventilador continúa operando durante un periodo para eliminar todos los gases de la combustión restantes que haya dentro y así se busca también eliminar factores de corrosión y otros factores poco favorables (Post-purga o post-barrido).
- **Protecciones eléctricas:** En el tablero de control de los quemadores los equipos tienen de acuerdo a su necesidad las protecciones eléctricas a motores (Contactores térmicos).
- **Sistema de control:** El quemador requiere de controles para su operación, estos controles determinan el buen funcionamiento del mismo, manteniéndolo dentro de las condiciones normales exigidas. Dentro de los controles principales se encuentran:
 - Los indicadores: Termómetros (chimenea), Manómetros en psi y en pulgadas de agua.
 - Controladores: Control de combustión.
 - Sistema eléctrico, comando y protección: Contactores, Relevos, Switches.
 - Sistema indicador: Bombillos de neon.

- **Encendido y arranque de los quemadores:** Es de gran importancia conocer el procedimiento adecuado de los quemadores.

Estos quemadores son de operación modulada o sea que pueden operar en régimen de fuego variable, dependiendo de la demanda de temperatura existente en el proceso.

Estos quemadores modulados tienen el sistema de modulación conformado por modutrol Honeywell, conjunto de varillas, tornillos escualizables y el respectivo controlador de temperatura para este caso. Según la selección de rango de temperaturas que haya realizado el cliente se calibra el controlador y dentro de este rango opera su encendido, modulado y apagado del quemador.

- **Potenciómetro:** Se emplea para el control manual del modutrol. Si se coloca en manual, es posible controlar la posición del modutrol Honeywell (posición Damper de aire y válvula principal de combustible eclipse) variando el régimen de fuego con el potenciómetro, lo que nos permite operar la caldera desde fuego alto hasta fuego bajo cuando se desee. De lo contrario el modutrol será fiscalizado por el controlador de temperatura que esta calibrado según la demanda de temperatura del proceso.

Calibración: para variar las proporciones aire-combustible se utiliza el sistema de varillas.

Varilla 1: es la varilla que une el modutrol Honeywell con la válvula reguladora de gas Eclipse. Cuando gira la varilla (por acción del modutrol) gira también esta varilla cerrando o abriendo la válvula según sea el caso.

Varilla 2: Esta varilla que une el juego de Damper del ventilador con el Modutrol Honeywell. Al igual que en la válvula de combustible, al girar determina el cierre o apertura del Damper de aire para dejar pasar o disminuir el aire que entra a la combustión.

Varilla 3: esta varilla une los dos Damper. La condición de tener dos Damper es

para contrarrestar la presión de aire y buscar su cierre al máximo de entrada al aire cuando se va a iniciar el encendido de la caldera para que una vez el piloto produzca la llama, esta no sea arrastrada y la foto-celda no alcance a detectar la llama, que si no la ve no ordena al programador la señal para que este a su vez ordene que se abran las válvulas principales de gas e incide definitivamente el encendido del quemador ya controlado.

Para determinar las relaciones de la mezcla se debe entonces alterar las longitudes y la posición de estas varillas según sea el caso.

6.1.2 Sección de Calentamiento

Figura 14. Sección de Calentamiento del petróleo crudo.



La sección de calentamiento, como su nombre lo indica es la encargada del calentamiento del crudo el cual ingresa por la parte superior del Tratador de esta respectiva sección, como lo muestra la fotografía 16, el crudo es esparcido gracias

a un recubrimiento metálico llamado baffle, el cual se encuentra entre los dos tubos de fuego y la parte superior interior del Tratador, el crudo es calentado mediante inducción de calor por los tubos de fuego provenientes de la sección de desgasificación, estos tubos ocupan casi la totalidad de la sección de calentamiento y son sostenidos por dos vigas horizontales y deslizados por dos rodillos cónicos como se puede observar en la fotografía anterior. En la parte inferior consta de la tubería removedora de lodo que lo hace a través de unos pequeños tubos llamados flautas donde aplican agua a presión para que este lodo sea llevado a la cámara de drenaje y evacuado por las tuberías de drenaje a la piscina API, con el fin de evitar la acumulación de este lodo y disminuir la capacidad de aceite en el Tratador, evitar corrosión en las paredes internas del TTE y taponamiento de la tubería de drenaje.

Figura 15. Fotografía de la entrada de crudo a la Sección de Calentamiento.



El calentamiento del crudo ya sea de tipo directo o indirecto tiene las siguientes ventajas:

-
- Reduce la viscosidad de la fase continua: un incremento en la temperatura de 10°F baja la viscosidad de la emulsión por un factor de 2.
 - Incrementa el movimiento browniano y la colisión de las gotas de agua para su coalescencia.
 - Incrementa la diferencia de densidad entre la salmuera y el crudo.
 - Promueve una mejor distribución del desemulsionante.
 - Disuelve las parafinas cristalizadas que le dan estabilidad a las emulsiones.
 - Debilita la película de emulsionante que rodea a las gotas de agua.
 - Sin embargo el calentamiento presenta las siguientes desventajas:
 - Provoca la migración de los compuestos más volátiles del crudo hacia la fase gas. Esta pérdida de livianos ocasiona una disminución de volumen del crudo calentado y una disminución en su gravedad API.
 - Incrementa los costos de combustible.
 - Incrementa los riesgos en las instalaciones.
 - Requieren mayor instrumentación y control.
 - Causa depósitos de coque.

Figura 16. Fotografía del control de nivel y temperatura de la Sección de Calentamiento.



La anterior fotografía muestra los indicadores de temperatura y nivel, este indicador de temperatura muestra la temperatura continua a la que esta sometido el crudo y es observado por el operador desde su cuarto de control, el cual maniobra la cantidad de llama aplicada en los tubos de fuego con el fin de mantener la temperatura entre 155 a 165°F con el objetivo de conseguir una deshidratación buena y lograr una temperatura adecuada para alcanzar todas la ventajas nombradas anteriormente y poder conseguir el mejor proceso de desmulsificación en la sección de coalescencia.

El operador al maniobrar la llama de fuego inyectada a los tubos y no logra adecuarla, da por entendido que la sección de desgasificación esta en dificultades y de inmediatamente esta es atendida por los técnicos instrumentistas.

En cuanto a la medición de nivel se observa la cantidad de agua y salmuera desprendida del aceite, que se hace de manera local a través de visores de vidrio con recubrimiento metálico y también es observado por el operador desde su cuarto de control, esta señal es transmitida por transmisores de nivel de interfase tipo radar que soportan grandes temperaturas. Agua, salmuera y lodos son evacuados por tubos de drenaje controlados por una válvula de forma automatizada o por el operador cuando existen gran cantidad de agua y otros, el

operador puede observar en que momento esta válvula está trabajando de manera inadecuada. La evacuación de agua y otros se realiza con el fin de evitar que la vasija se llene de esta agua y disminuya la cantidad de aceite que se requiere que circule hacia los grandes tanques y de ahí enviado a refinería.

Figura 17. Fotografía de la válvula de control de gas de la Sección de Calentamiento.



En cuanto a la presión interna del TTE intervienen el aceite y todo lo que contiene y el gas ya sea el que se produce por el calentamiento del crudo y por el que es introducido, el principal control de presión del TTE es efectuado gracias al gas, en el momento de deficiencia de gas se le inyecta gas externo todo con el fin de mantener dicha presión, esta presión se mantiene en un gran porcentaje gracias a la sección diferencial, la presión dentro del TTE en su sección de calentamiento permite aumentar la temperatura con el fin de reducir la estabilidad de la emulsión. Según medidas de temperatura dentro de la vasija no se alcanza al punto de ebullición del agua, debido a que las temperaturas registradas están dentro de 155 a 165°F , donde el punto de ebullición del agua es de 212 °F. La anterior fotografía muestra una de las dos válvulas que realizan el control de

dicho gas, una para el gas que sale en el caso de sobre-presión y otra para inyectar gas en el caso de deficiencia de dicho gas que lo hace a través de la campana de regulación. El control de estas válvulas se realiza de forma automatizada.

6.1.3 Sección Diferencial

Figura 18. Fotografía de la Sección Diferencial.



La sección diferencial se encuentra ubicada en la parte media de la longitud total del TTE, la sección diferencial hace el papel de sifón, el crudo entra por rebose de la sección de calentamiento a la sección de coalescencia por medio de la sección diferencial por la parte superior interna de la vasija, como se puede apreciar en la fotografía anterior.

Entre sus funciones está impedir el paso de gas a la sección de coalescencia, este gas es introducido y producido por el calentamiento del crudo gracias a los tubos de fuego ubicados en la sección de calentamiento.

El crudo proveniente de la sección diferencial es distribuido por un bafle que se encuentra a lo largo de toda la sección de coalescencia en la parte inferior interna de la vasija, el crudo es repartido a través de orificios por dicho bafle, con el objetivo que el crudo sea distribuido de forma uniforme y atenuada, evitando turbulencias en el crudo.

6.1.4 Sección de Coalescencia

Figura 19. Fotografía de la Sección de Coalescencia.



La coalescencia se define como un fenómeno irreversible en el cual las gotas emulsionadas pierden su identidad, el área interfacial se reduce y también la energía libre del sistema (condición de inestabilidad). Sin embargo, este fenómeno se produce sólo cuando se vencen las barreras energéticas asociadas con las capas de emulsionante adsorbido y la película de fase continua entre las dos gotas. Esta etapa puede considerarse como instantánea respecto a las dos primeras etapas.

Los procesos de deshidratación utilizan efectos físicos destinados a aumentar la velocidad de la primera etapa, tales como el calentamiento, que reduce la viscosidad de la fase externa y aumenta la diferencia de densidad entre los fluidos; ó un aumento de la cantidad de fase interna reduciendo el recorrido promedio de cada gota antes del contacto con otra.

También es posible usar fuerzas diferentes a la gravedad natural para aumentar la velocidad de contacto y/o el tamaño de la gota: gravedad artificial por centrifugación, fuerzas capilares con filtros coalescedores o fuerzas electrostáticas.

Las superficies de las gotas en una emulsión desarrollan una capa doble eléctrica en la misma forma como partículas sólidas en una suspensión. Esto tendería a producir una fuerza electrostática de repulsión entre las gotas. Esto es generalmente aceptado que las tasas de separación incrementada eléctricamente resultan de la acción de fuerzas eléctricas, las cuales incrementan la tasa de gotas coalescentes. Cuando un campo eléctrico es aplicado, la coalescencia de gotas suspendidas puede ocurrir en la fase continua así como las gotas chocan a velocidades diferentes. Este proceso es incrementado por los dielectrophoresis, que se entiende por el movimiento lateral que imparten en partículas descargadas como resultado de la polarización inducida por la falta de uniformidad en los campos eléctricos, los cuales proveen una fuerza de atracción entre las dos gotas polarizadas. Sin embargo varios modelos diferentes han sido propuestos para las fuerzas eléctricas para trabajar en una suspensión de gotas, la magnitud de las fuerzas es siempre dependiente de la magnitud del campo eléctrico aplicado al sistema electrostático.

La evidencia práctica obtenida con las separaciones de agua/petróleo crudo ha mostrado que casi cualquier tipo de campo de voltaje alto, promoverá a alguna extensión la separación de las emulsiones agua-en-petróleo. Los mecanismos por los cuales esto puede ocurrir no están claramente entendidos, excepto que si un gran gradiente de potencial puede ser establecido y mantenido en la fase continua

de una emulsión, esto causa demasiadas gotas finas para crecer por coalescencia entre ellas, a un punto donde ellas caen de la fase continua bajo la acción de gravedad.

Una de las propiedades importantes en la emulsión es que interviene en la deshidratación electrostática es la conductividad eléctrica.

La conductividad Eléctrica es una propiedad que nos proporciona información acerca de la capacidad de conducir energía eléctrica que posee un cuerpo. Para proporcionar un modo conveniente de distinguir entre la emulsión o/w y w/o.

Se puede esperar que las emulsiones o/w demuestren una alta conductividad eléctrica contrario a las w/o, las cuales poseen una conductividad eléctrica baja nula.

Sin embargo, esto no es totalmente cierto debido a que esta propiedad se ve afectada por el agente emulsificante, donde por su naturaleza y concentración puede llegar a afectar esta propiedad en forma bastante significativa.

La mayoría de veces, es necesario usar combinaciones de varios métodos para tratar efectivamente las emulsiones, de tal forma que incidan en optimizar el uso de químicos, menores temperaturas, disminución en la pérdida de hidrocarburos livianos, bajo costo y reducir el tiempo de tratamiento.

Existen ciertos factores que disminuyen la velocidad de separación de las fases que conforman la emulsión.

- Alta velocidad de la fase continua, o aumento de la misma por tratamiento a baja temperatura.
- Pequeños diámetros de partícula de la fase dispersa.
- Poca diferencia de densidades entre aceite y agua.

Por las anteriores razones, las prácticas de tratamiento se encaminan al aumento

del tamaño de las gotas y siempre que sea necesario, al aumento de la diferencia entre las densidades de aceite.

Todos los diferentes métodos antes mencionados, han sido desarrollados como solución al tratamiento de emulsiones directas (w/o) formadas durante el proceso de producción de crudo, pero sus principios son extendidos a la deshidratación de otros tipos de emulsiones.

- **Aplicaciones.** La técnica de coalescencia electrostática puede ser usada para separar las gotas dispersas de otro líquido dieléctrico. La industria del petróleo ha estado usando esto para separar salmuera emulsificada en petróleo crudo; la industria química usa esto para resolver emulsiones agua-en-petróleo (w/o) generados durante los procesos de extracción líquida. La técnica puede además ser usada para romper emulsiones w/o en procesos de separación de membrana líquida. Actualmente, la única gran escala de aplicación de coalescencia electrostática ocurre en la industria del petróleo para resolver emulsiones agua-en-petróleo que surge bien durante la producción, cuando el petróleo crudo y el agua son coproducidos, o durante la refinación, cuando el agua es deliberadamente emulsificada en el petróleo crudo para ayudar la remoción de impurezas hidrofílicas tales como la sal.

- **Fenómeno de coalescencia aumentada eléctricamente⁷.** Un campo eléctrico aplicado tiene varios efectos sobre gotas acuosas dispersas en el petróleo. La naturaleza aislada de la fase continua de petróleo permite el establecimiento de un campo eléctrico alto a través de la emulsión. Este campo puede polarizar y prolongar las gotas acuosas. Esto puede causar migración unidireccional de las gotas en emulsiones diluidas por fuerzas electrodinámicas, por ejemplo, por un mecanismo electroforesis (carga de espacio) o por un mecanismo dielectroforesis

⁷ Hirato T., Koyama K., Tanaka T., Awakura Y., Majima H. Demulsification of Water-in-Oil Emulsión by an Electrostatic Coalescence Methodology. Mater. Trans. 52, 257 (1991).

(movimiento de dipolos en un campo eléctrico no uniforme). Cuando la concentración de gotas llega a ser alta, esta puede además causar la coalescencia de las gotas dentro de grandes gotas.

Los mecanismos que promueven la coalescencia de las pequeñas gotas por campos eléctricos no son entendidos claramente, sin embargo esto es generalmente aceptado que los campos eléctricos producen fuerzas de coalescencia sobre las gotas en emulsiones tipo agua-en petróleo. Algunos modelos en conflicto proponen relacionar la fuerza con la fuerza del campo eléctrico y las propiedades líquidas y geométricas. Un número de mecanismos diferentes han sido propuestos para la separación de dispersiones líquido-líquido en un campo eléctrico. Ellos pueden involucrar tales efectos como la formación de enlace; dielectroforesis; electroforesis; formación de lazos intermoleculares; coalescencia bipolar; y electrofining; y colisiones aleatorias.

- **Coalescencia con formación de enlace⁸**. Existe un mecanismo de dos pasos de formación de enlace y coalescencia por dispersiones en el cual el agua contenida es menos que el 10% por volumen y el tamaño de la gota en el rango de 5-30 μ .m en diámetro basado en observaciones con ambos campos DC y AC. La formación de enlaces es caracterizada por el siguiente fenómeno:

- No hay movimiento general de gotas en la dirección de fuerza de campo máximo.
- Los enlaces de gotas son formados por movimientos de gotas únicas en direcciones aproximadamente perpendiculares a la longitud de los enlaces.
- Los enlaces se ubican en la dirección general de fuerza de campo máximo.

⁸Hirato T., Koyama K., Tanaka T., Awakura Y., Majima H. Demulsification of Water-in-Oil Emulsión by an Electrostatic Coalescence Methodology. Mater. Trans. 52, 257 (1991).

- Los enlaces no siempre empiezan o finalizan en un electrodo; ni tampoco ellas están completas.

Los enlaces se forman por fuerzas debido a las diferencias de potenciales entre las gotas como un resultado de sus cargas inducidas. El segundo paso, coalescencia, probablemente depende de dos factores actuando juntos o independientemente:

- Falla dieléctrica de la película de fase continua entre las gotas adyacentes.
- La fuerza atractiva entre gotas debido a su diferencia de potencial.

El efecto es mas directamente determinado por la resistividad entre las dos fases liquidas.

- **Deshidratación Electrostática**

Figura 20. Fotografía del Sistema Electrostático.



Los compuestos desmulsificantes en unión con los dispositivos adecuados para una buena separación gravitacional, pueden remover hasta un 80% del agua presente en una emulsión w/o.

La remoción de agua remanente es muchos mas difícil que la remoción de agua libre, entendiendo como agua remanente el agua emulsionada en el aceite y agua libre como el agua que se separa por simple gravedad. Las pequeñas gotas, separadas del gran cuerpo de agua y suspendidas de diferentes densidades, coexisten en la forma de menor energía.

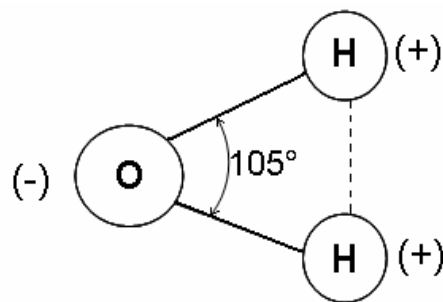
La coalescencia Electrostática a alto voltaje ha sido utilizada por la industria del petróleo que vende crudo con cierto contenido de agua y sal.

Todas la secciones de las que esta conformado el Tratador Térmico Electrostático tienen con finalidad mejorar el proceso de rompimiento de la emulsión.

El principio básico para la coalescencia electrostática es la composición de la molécula de agua, un átomo de oxigeno por dos átomos de hidrogeno, juntos en una configuración que responde a un campo electrostático.

En la figura 21 se observa la unión de los dos átomos de hidrogeno al átomo de oxigeno formando un ángulo de 105°.

Figura 21. Estructura de la molécula de Agua.



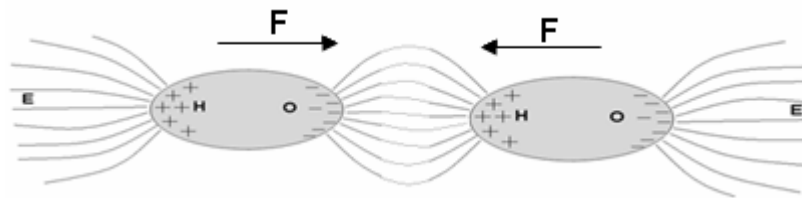
Esta configuración es propia para la formación de un dipolo, el cual responde a la aplicación de la fuerza de un campo eléctrico.

En este estado de dipolo inducido, la elongación de la gota podría distorsionar la

película que rodea la gota y exponerla a la gota adyacente y de esta manera provocar la coalescencia más fácilmente. Sin embargo el desplazamiento de las cargas de las gotas esta afectada por el campo eléctrico aplicado por los electrodos.

- **Fuerza de atracción entre gotas.** Cuando se tiene dos partículas adyacentes, se presenta una fuerza de atracción mutua que debe ser de magnitud suficiente para que al chocar se rompan las películas de las gotas permitiendo la coalescencia.

Figura 22. Atracción entre gotas emulsionadas.



La fuerza resultante entre dos gotas cargadas está dada por la Ley de Coulomb:

$$(1) \quad F = \frac{q_1 \times q_2}{4 \times \pi \times \epsilon \times X^2}$$

Donde q es la carga de la gota, X es la distancia entre los centros de las gotas y ε la permitividad de la fase continua. La dirección del movimiento depende de la polaridad de la carga y del campo eléctrico. Para una gota cargada por contacto directo con un electrodo, la fuerza resultante se reescribe:

$$F = \frac{K \times E^2 \times D^6}{X^4} \quad (2)$$

F= Fuerzas de atracción entre las gotas.

D= Diámetro de la partícula de agua.

X= Distancia entre las partículas (centro a centro).

$K=3\pi^2\epsilon_R\epsilon_0$, constante dieléctrica.

E= Campo eléctrico aplicado.

Para aumentar la fuerza de atracción entre las partículas adyacentes, se requiere:

- Aumentar el voltaje aplicado (sujeto a control)
- Aumentar D
- Disminuir X

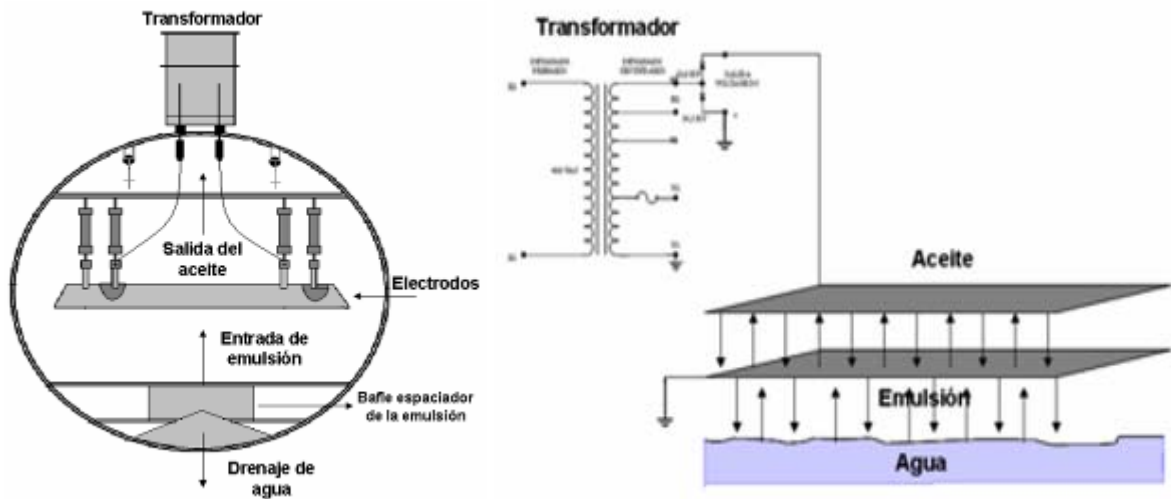
La atracción del dipolo es proporcional al cuadrado del campo eléctrico; por ello uno esperaría que los campos más altos mejoraran la coalescencia. En la práctica esto es restringido por un campo eléctrico crítico, el cual depende del sistema involucrado y de la geometría del electrodo, donde la gota rompería y emulsionaría debido a la densidad de carga de la gota.

Esta fuerza ocasiona que la gota cargada migre hacia el electrodo de carga opuesta y se inicie entonces el contacto con otras gotas, permitiendo la coalescencia. Para dos gotas polarizadas de igual tamaño alineadas en el campo eléctrico la fuerza resultante esta dada por la ecuación anterior.

En un campo D.C. (corriente directa), las gotas migrarán en un patrón continuo con una velocidad determinada por la viscosidad de la fase continua. Las gotas gradualmente perderán su carga, dependiendo del tiempo de relajación de la fase continua.

En el caso de corriente continua (A.C.), una gota cargada tenderá a oscilar en una posición media entre los electrodos. Una gota puede llegar a cargarse por otros mecanismos tales como: ionización, adsorción preferencial de iones a la interfase (doble capa eléctrica) o transferencia de carga convectiva desde un electrodo por la fase orgánica.

Figura 23. Esquema de aplicación del Campo Electroestático.



El esquema anterior muestra los componentes requeridos para la aplicación del campo electrostático usando voltaje AC.

Este lo conforman tres componentes primarios:

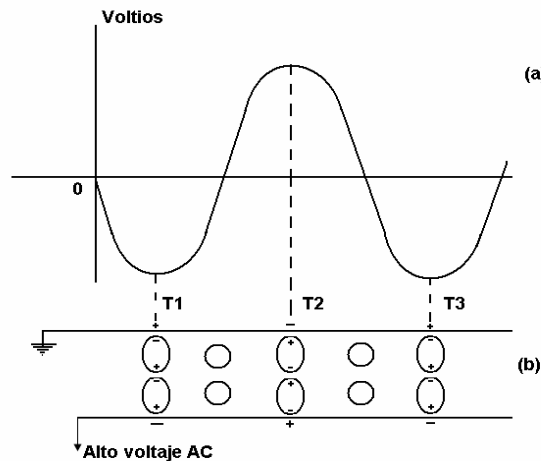
Fuente de poder. La cual suministra el voltaje primario de línea, una fase AC, 220-480 v, 50-60 Hz y el transformador convierte al voltaje necesario de 12-30 kv, 50-60 Hz que es alimentado al Tratador a través de un buje llamado bushing o sello de presión, el cual va conectado a la carcasa del electrodo interior (placas paralelas) que se denomina electrodo cargado y al electrodo conectado a tierra.

Como se muestra en la figura 23, existen dos campos separados debido a la configuración. Uno se presenta entre los electrodos del equipo y el otro de menor intensidad se forma entre el electrodo cargado y la interfase aceite/agua, debido a que el agua es un polo a tierra y actúa como tercer electrodo del sistema.

La figura 24-a es una representación de la onda sinusoidal AC aplicada en el Tratador Térmico Electroestático. La figura 24-b es una muestra del electrodo que

esta cargado y el que esta a tierra que crean el campo AC, con las gotas suspendidas en el área de gran gradiente entre los electodos.

Figura 24. Representación de comportamiento de las gotas de agua en comparación con la onda sinusoidal AC.



El análisis del grafico anterior muestra la existencia de tiempos inefectivos por su misma naturaleza.

El tiempo T1, la curva sinusoidal es negativa y carga el electrodo. El electrodo a tierra es positivo, el par de gotas se alinean de acuerdo a dichas polaridades. Debido a que la onda sinusoidal se vuelve positiva, pasando a través de la línea base ó cero y en este instante no hay campo eléctrico alguno, por consiguiente las gotas toman la forma de mas baja energía, como lo muestra las dos esferas adyacentes al primer par de gotas cargadas.

La onda continua hacia la posición positiva en el tiempo T2 y las polaridades se invierten. Este cambio continúa 120 veces/seg. Aunque una fuerza de atracción es creada siempre que la onda no este realmente en la línea base, esta es una fuerza de atracción variable.

En la ecuación 2 se observa que el campo eléctrico E y aparece como un componente elevado a la segunda potencia. La magnitud de la fuerza de atracción variable depende del campo eléctrico.

Aproximadamente el 50% del tiempo, el campo eléctrico es reducido por el carácter de voltaje AC siendo intelectivo en un área que se supone de alto campo eléctrico, lugar donde se realiza el trabajo final y mas difícil de la coalescencia de las mas pequeñas partículas de agua.

Los tamaños de partículas en este punto del sistema van de 100 a 1 micrón. Obviamente un gradiente eléctrico invariable altamente efectivo es necesario para la coalescencia de las más diminutas partículas donde la separación gravitacional puede oponerse al empuje vertical de la corriente ascendente de emulsión.

El uso de tensión AC en áreas de bajo gradiente entre la interfase de agua y el electrodo cargado es esencial en esta área del proceso de mayor contenido de agua. Los tamaños de las gotas removidas de la corriente, en esta fase son considerables y responden fácilmente a este campo cambiante debido a su tamaño y a su número, el cual las acerca bastante.

En la aplicación de potenciales de polaridad dual, tanto para el positivo como para el negativo, el área de alto gradiente entre electrodos provoca exitosamente la coalescencia de la mayoría de gotas de 1 y 2 micrones, dando como resultado un muy bajo contenido de agua en el efluente del Tratador.

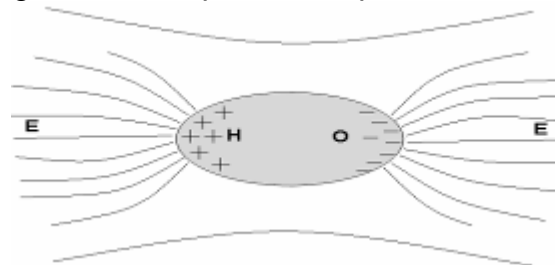
- **Petróleo crudo como Dieléctrico.** La característica de todos los dieléctricos, ya sea sólidos, líquidos o gases, tengan o no estructura cristalina, tienen capacidad para almacenar energía. Este almacenamiento da lugar al cambiar las posiciones relativas de las cargas positivas y negativas ligadas en el interior en contra de las fuerzas moleculares atómicas.

Estos desplazamientos en contra de la fuerza de restitución, es similar a levantar un peso o estirar un resorte, ya que representan energía potencial, la fuente de esta energía es el campo eléctrico externo, el desplazamiento de estas cargas puede producir una corriente transitoria en el interior de la placas o electrodos quienes producen el campo eléctrico.

El mecanismo real por el cual la carga se desplaza es diferente entre varios

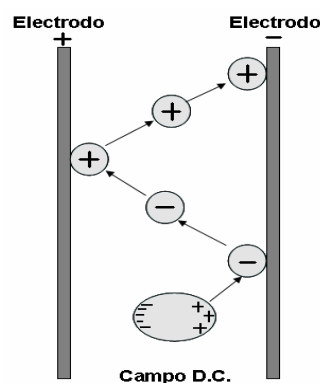
materiales. Algunas moléculas, llamadas moléculas polares, tienen un desplazamiento permanente entre el centro de gravedad de la carga negativa y positiva, y cada par de cargas actúa como un dipolo. Normalmente los dipolos están orientados aleatoriamente en el interior del material y la acción del campo eléctrico externo sobre estas moléculas en nuestro caso son moléculas de agua, las alinea, hasta cierto punto, en la misma dirección. Un campo lo suficientemente intenso tanto AC como en DC pueden producir desplazamientos adicionales entre cargas positivas y negativas.

Figura 25. Dipolo de agua formado por el Campo Eléctrico externo.



En investigaciones realizadas se ha podido estudiar el fenómeno que hace que los voltajes D.C. sean tan efectivos y permitan remover grandes cantidades de agua. Este principio se esquematiza en la siguiente figura.

Figura 26. Movimiento de una gota de agua entre dos electrodos de polaridad dual.



En esta figura se representa el petróleo crudo fluyendo verticalmente con una sola gota de agua presente. A medida que la gota entra en el alto gradiente D.C. entre los electrodos, éste le induce una carga a la superficie de la gota, que es igual a la del electrodo más cercano, por lo que inmediatamente ambos se repelen y la gota es atraída hacia el electrodo de carga contraria.

Cuando la gota se acerca al electrodo de carga contraria, la carga superficial de la gota se altera por el gran potencial del ahora electrodo más cercano, lo que hace que sea repelida de nuevo y atraída por el electrodo de carga contraria. Este movimiento de la gota es una migración ordenada entre los electrodos. Los altos potenciales D.C. retienen a las gotas de agua hasta que sean suficientemente grandes como para sedimentar.

Considerando lo anteriormente expuesto para un sistema de una emulsión W/O con miles de gotas de agua. Las gotas polarizadas (cargadas mitad positivamente y mitad negativamente) tenderán a colisionar entre sí, por lo cual la coalescencia ocurrirá más rápido. Este fenómeno también hace que gotas en medios más viscosos colisionen, y es necesario altas temperaturas.

Cuando la coalescencia de este sistema de deshidratación es continua y de barrido, no solo resulta un aceite más deshidratado a la salida, sino que también significa que las gotas pueden ser forzadas a moverse hasta colisionar en un medio más viscoso que es otra manera de decir que la deshidratación puede ocurrir a menor temperatura.

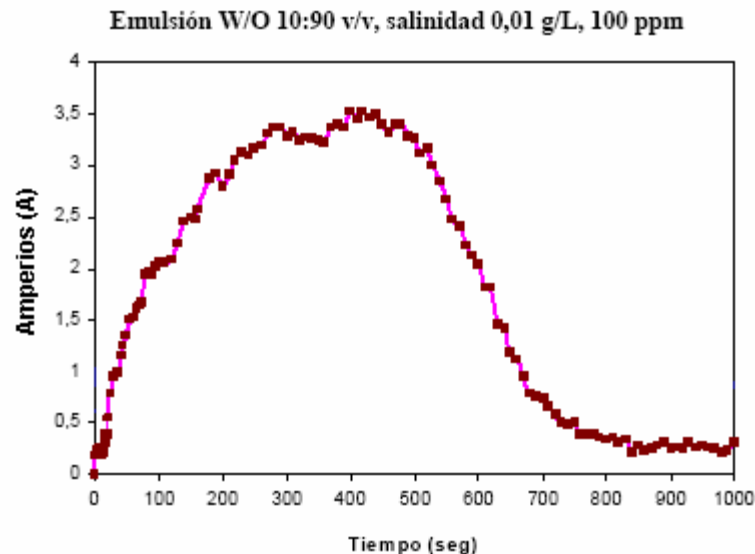
Además la coalescencia ocurre rápidamente, resultando gotas mucho mas grandes para separarse fácilmente por gravedad. Como las gotas son mas grandes, pueden soportar un flujo mayor, lo que con lleva a un procesamiento de mayor cantidad de emulsión.

Otro agregado, es el perfil corriente-voltaje obtenido en la deshidratación electrostática de una emulsión agua en crudo aplicando un campo eléctrico D.C. de 1.000 Voltios/cm y una dosificación de 100 ppm de química deshidratante (resina fenol formaldehído), figura 28. Se observa que inicialmente la corriente



aumenta de manera considerable, luego alcanza un máximo y después disminuye hasta valores cercanos a cero.

Figura 27. Perfil de intensidad de corriente en función del tiempo durante la deshidratación electrostática de una emulsión agua en petróleo crudo.



Fuente: Demulsification of Water-in-Oil Emulsión by an Electrostatic Coalescence Methodology. Mater. Trans. 52, 257 (1991).

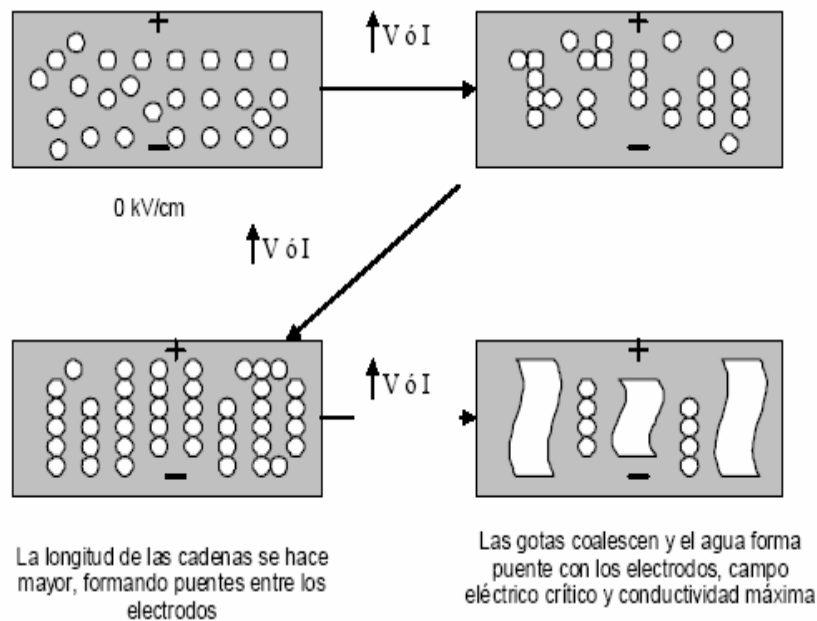
Taylor encontró que la forma de tales perfiles, puede explicarse de la siguiente manera:

- Un período inicial durante el cual ocurre el alineamiento de las gotas en cadena como si fuera un rosario de nominado percolación.
- Un período en el cual las cadenas de gotas de gran longitud forman un puente entre los electrodos, ocasionando un incremento en la conductividad de la emulsión.
- Un punto en el cual la conducción de corriente alcanza un máximo.

- Una región caracterizada por una conductividad altamente errática, eventualmente disminuye a cero, como consecuencia de la disminución del nivel de agua en la emulsión debido al progreso de coalescencia de las gotas.

Taylor sugirió lo siguiente: “el proceso inicial es capacitivo, resultando quizás de la conducción superficial en las gotas de agua que se tocan, más que de la conducción a través de las gotas. Esta fase inicial es influenciada por factores como: viscosidad de la fase aceite, volumen de la fase dispersa y voltaje aplicado. En la última región la conducción ocurre a través de las gotas (coalescencia), y la duración de está zona se ve afectada por el voltaje aplicado y la presencia de aditivos químicos; a mayor voltaje o mayor concentración de química, más rápida es la deshidratación”. En la siguiente figura se ilustra esquemáticamente el proceso de electro-coalescencia.

Figura 28. Esquema del proceso de Electro-Coalescencia.



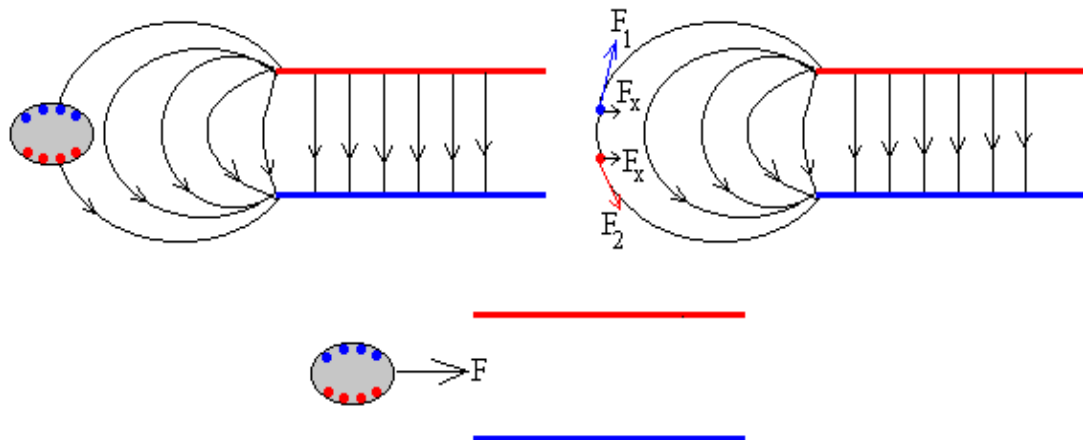
Fuente: Cuaderno FIRP 747-A, Módulo de enseñanza en Fenómenos Interfaciales, Laboratorio FIRP, Universidad de los Andes, Mérida (1999).

- **Fuerza sobre un Dieléctrico⁹.**

¿Por qué los objetos dieléctricos se mueven hacia los campos eléctricos más intensos?

En un condensador de plano-paralelo el campo no está confinado en el interior del condensador, sino que es intenso entre las placas y disminuye rápidamente fuera de las mismas. Como las placas están separadas una distancia pequeña en comparación con sus dimensiones, podemos considerar despreciable el campo fuera de las mismas. Sin embargo, este campo no homogéneo es el responsable de la atracción que experimenta un dieléctrico que se acerca a las proximidades de un condensador cargado.

Figura 29. Líneas de Campo Eléctrico entre placas.



Un dieléctrico en un campo eléctrico presenta cargas inducidas en su superficie, negativas cerca de la placa positiva y positiva cerca de la placa negativa. Como vemos en la figura anterior la carga inducida negativa (positiva) está más cerca de la placa positiva (negativa) de la placa del condensador, existe una fuerza neta sobre el cuerpo dieléctrico que lo arrastra hacia el interior del condensador.

⁹ Teoria/electromagnet/campo.electrico/dielectrico1/dielectrico1.htm.



Si mantenemos V constante (El transformador conectado permanentemente a las placas o electrodos). La energía del condensador cargado es:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3)$$

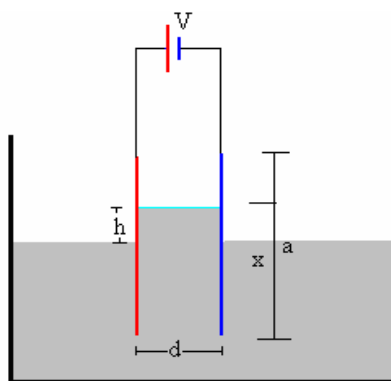
- **Efecto sobre los Dieléctricos líquidos.**

Vamos a considerar dos casos:

* **Cuando la superficie del dieléctrico es paralela a las líneas de campo eléctrico.**

Consideremos un condensador plano-paralelo cuyas armaduras son perpendiculares a la superficie de un dieléctrico líquido de constante dieléctrica k . Cuando introducimos el condensador en el recipiente que contiene el dieléctrico su superficie libre se eleva entre las placas del condensador, tal como se muestra en la figura 31.

Figura 30. Nivel de crudo entre placas.



Sean a y b la dimensiones de la placa rectangular, Si el dieléctrico está introducido una longitud x en el condensador su capacidad es la suma de las capacidades de dos condensadores uno de longitud x con dieléctrico y otro de longitud $a-x$ en el vacío.



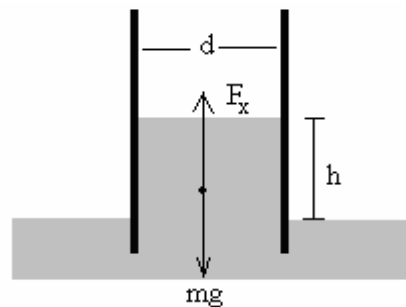
$$C = \frac{k \epsilon_0 b x}{d} + \frac{\epsilon_0 b (a - x)}{d} \quad (4)$$

Si la diferencia de potencial en el condensador V permanece constante, entonces la fuerza vertical que se ejerce sobre la superficie libre del líquido dieléctrico, perpendicularmente a las líneas del campo es:

$$F_x = \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_V = \frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\epsilon_0 (k - 1) b}{2d} V^2 \quad (5)$$

Esta es la fuerza que hace que el líquido ascienda

Figura 31. Fuerza del crudo entre placas.



En el equilibrio la fuerza que ejerce el campo eléctrico sobre el dieléctrico F_x se iguala al peso de la columna de líquido $mg = \rho g b h d$.

$$h = \frac{\epsilon_0 (k - 1)}{2 \rho g} \left(\frac{V}{d} \right)^2 \quad (6)$$

La presión p que hace la columna de líquido de altura h es

$$p = \rho g h = \frac{1}{2} \epsilon_0 (k - 1) E^2 \quad (7)$$

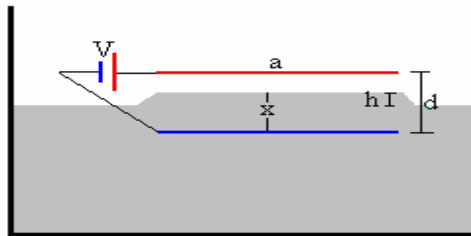
Donde $E = V/d$ es la intensidad del campo eléctrico entre las placas del condensador vacío.



La presión, en la superficie de separación entre dos medios dieléctricos es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico E .

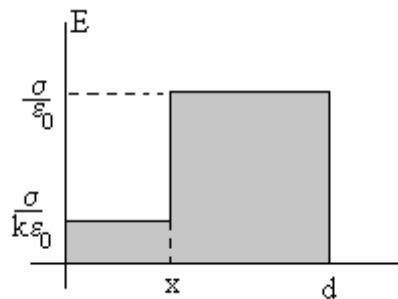
*** Cuando la superficie del dieléctrico es perpendicular a las líneas de campo eléctrico.**

Figura 32. Condensador plano paralelo



Consideremos un condensador plano-paralelo cuyas armaduras son paralelas a la superficie de un dieléctrico líquido de constante dieléctrica k . Cuando introducimos el condensador en el recipiente que contiene el dieléctrico su superficie libre se eleva entre las placas del condensador, tal como se muestra en la figura anterior.

Figura 33. Placas paralelas en forma horizontal.



La diferencia de potencial entre las placas del condensador es la suma de las áreas sombreadas (figura de la derecha)

$$V = \frac{\sigma}{k\epsilon_0} x + \frac{\sigma}{\epsilon_0} (d - x) \quad \sigma = \frac{Q}{ab} \quad (8)$$

σ es la densidad de carga (coulomb por m²). La fórmula de capacidad del condensador $C=Q/V$ es

$$C = \frac{k\epsilon_0 ab}{x + kd - kx} \quad (9)$$

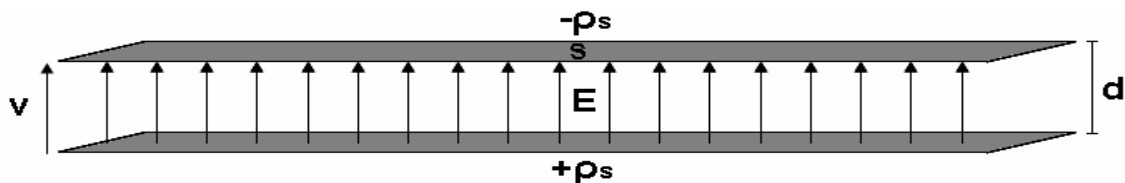
La misma expresión de la capacidad C , podía haberse obtenido considerando el condensador como la agrupación de dos condensadores en serie, uno de espesor x con dieléctrico y otro de espesor $d-x$ sin dieléctrico.

Calculamos la energía U , y a continuación la fuerza F derivando respecto de x . Haciendo operaciones, de forma similar al ejemplo anterior, obtenemos la presión debida a la columna de fluido de altura h , en la superficie del dieléctrico

$$p = \frac{F}{S} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{1}{k}\right) E^2 \quad \text{con} \quad E = \frac{V}{d} \quad (10)$$

- **Capacitancia.**

Figura 34. Carga superficial en las placas paralelas.



Se define como la razón entre la magnitud de la carga de cualquiera de los conductores y la magnitud de la diferencia de potencial entre ellos. La capacitancia siempre es una cantidad positiva y puesto que la diferencia de potencial aumenta a medida que la carga almacenada se incrementa, la proporción Q / V es constante para un capacitor dado. En consecuencia la capacitancia de un dispositivo es una medida de su capacidad para almacenar carga y energía potencial eléctrica.

La capacitancia de un dispositivo depende entre otras cosas del arreglo

geométrico de los conductores.

Realizando las conversiones la capacitancia es función de solo las dimensiones físicas del sistema de conductores y de la permitividad del dieléctrico homogéneo.

$$C = \frac{\epsilon \times S}{d} \quad (11)$$

Donde ϵ es la permeabilidad del medio, S es el área de las placas y d es la separación entre placas.

La capacitancia se mide en faradios (F), donde el faradio esta definido como un Coulomb por Volt. Los valores comunes de la capacitancia son fracciones muy pequeñas de un faradio y consecuentemente es mas practico utilizar como unidades los microfaradios (μF) y el picofaradio (pF).

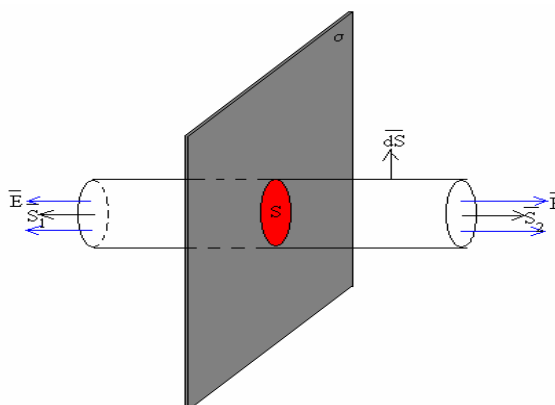
- **Campo Eléctrico.** Las cargas estáticas residen en las superficies de un conductor y no en su interior; por esta razón, ρ_s comúnmente se conoce como densidad de carga superficial.

Si el campo eléctrico externo es descompuesto en dos componentes, una tangencial y otra normal a la superficie del conductor, se puede observar que la componente tangencial es cero. Si así no ocurriera, una fuerza tangencial se aplicaría en las cargas de la superficie, dando como resultado su movimiento y condiciones no estáticas. Pero como se han supuesto condiciones estáticas, el campo eléctrico tangencial y con esto la densidad de flujo deben ser cero.

La ley de Gauss contesta la pregunta relativa a la componente normal.

En primer lugar, calculamos el campo creado por una placa plana indefinida, cargada con una densidad de carga ρ_s , aplicando la ley de Gauss.

Figura 35. Campo creado por una placa plana indefinida, cargada.



Para una placa indefinida cargada, la aplicación del teorema de Gauss requiere los siguientes pasos:

- **A partir de la simetría de la distribución de carga, determinar la dirección del campo eléctrico.**

La dirección del campo es perpendicular a la placa cargada, hacia afuera si la carga es positiva y hacia la placa si la carga es negativa.

- **Elegir una superficie cerrada apropiada para calcular el flujo.**

Tomamos como superficie cerrada, un cilindro de base S , cuya generatriz es perpendicular a la placa cargada. El flujo tiene dos contribuciones

- Flujo a través de las bases del cilindro: el campo y el vector superficie son paralelos.

$$E \cdot S_1 + E \cdot S_2 = 2 \cdot E \cdot S \cdot \cos 0^\circ = 2 \cdot E \cdot S \quad (12)$$

- Flujo a través de la superficie lateral del cilindro. El campo E es perpendicular al vector superficie $d \cdot S$, el flujo es cero.

El flujo total es por tanto; $2 \cdot E \cdot S$ y la carga en el interior de la superficie cerrada esta dada por $q = \rho_s \cdot S$

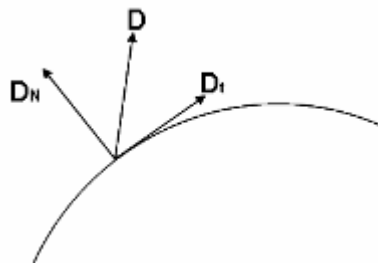
- **Aplicar el teorema de Gauss y despejar el módulo del campo eléctrico**

$$2 \times E \times S = \frac{\rho_s \times S}{\epsilon} \qquad E = \frac{\rho_s}{\epsilon} \quad (13)$$

El campo producido por una placa infinitamente grande es constante, su dirección es perpendicular a la placa. Esta fórmula la podemos considerar válida para distancias próximas a una placa en comparación con sus dimensiones.

El flujo eléctrico que abandona una superficie debe ser igual a la carga que en ella se encuentra. El flujo no puede salir de una dirección tangencial ya que su componente es cero, por lo que lo debe ser normal a la superficie. Cuantitativamente, se puede decir que la densidad de flujo eléctrico D , medido en Coulombs por metro cuadrado, tiene una dirección normal a la superficie y es igual a la densidad de carga, es decir:

Figura 36. Densidad de Flujo Eléctrico de forma vectorial.



$$D_N = \varepsilon \times E_N = \rho_S \quad (14)$$

El flujo eléctrico sale del conductor en una dirección normal a la superficie y el valor de la densidad del flujo eléctrico es numéricamente igual a la densidad superficial de carga.

Una consecuencia inmediata de que la componente tangencial de la intensidad de campo eléctrico sea cero, es el hecho de que la superficie de un conductor es una superficie equipotencial.

De la ecuación anterior podemos deducir que el campo eléctrico entre dos placas esta dado por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\rho_S}{\varepsilon} \quad (15)$$



La diferencia de potencial entre dos planos superior e inferior es:

$$V = E \times d = \frac{\rho_s \times d}{\epsilon} \quad (16)$$

Donde se concluye que el campo eléctrico producido entre cada par de placas también es igual a:

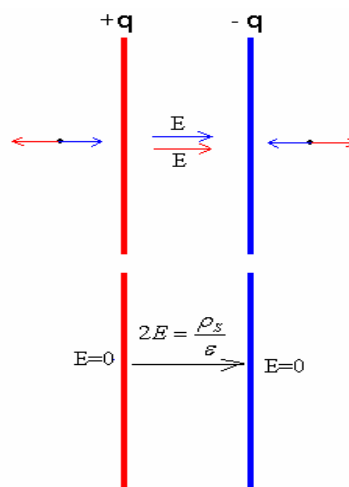
$$E = \frac{V}{d} \quad (17)$$

Donde la permitividad del espacio libre denominada ϵ_0 el cual tiene un valor de 8.854×10^{-12} y es multiplicada por la permitividad del medio en el que se encuentran dichas placas denominada ϵ_R en nuestro caso es la permitividad del crudo.

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_R \quad (18)$$

- **Campo creado por dos placas planas cargadas con cargas iguales y opuestas.**

Figura 37. Campo Eléctrico entre placas.



Supondremos que las placas son infinitamente grandes o bien, que la separación entre las placas es pequeña comparada con sus dimensiones.

En la figura anterior en la parte superior, se muestra el campo producido por cada una de las placas y en la parte inferior, el campo resultante.

Sea un condensador formado por dos placas iguales de área S , separadas una distancia d , pequeña en comparación con las dimensiones de las placas. El campo se cancela en la región del espacio situado fuera de las placas, y se suma en el espacio situado entre estas. Por tanto, solamente existe campo entre las placas del condensador, siendo despreciable fuera de las mismas.

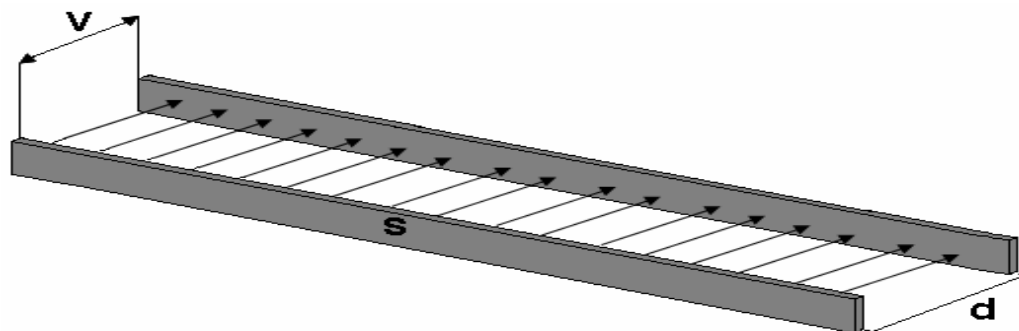
▪ **Características de la emulsión en presencia del campo eléctrico.**

- **Conductividad de una emulsión.** Cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos situados en una solución electrolítica, los iones están atraídos por los electrodos (de carga opuesta) y se genera una corriente eléctrica, cuya intensidad depende de dos factores:

* La geometría de la celda y electrodos.

* La resistencia eléctrica del medio.

Figura 38. Celda de conductividad.



$$R = \frac{\rho \times d}{S} \quad (19)$$

La anterior ecuación muestra la resistividad del medio que está entre los electrodos, donde depende la resistividad (ρ) del medio, la separación de las placas (d) y del área de las placas, las unidades de las placas esta dada por Ω/cm^2 .

El inverso de la resistencia se llama la conductancia (χ) y el inverso de la resistividad se llama conductancia específica o conductividad (k).

La conductividad de las dos fases que conforman una emulsión son en general muy diferentes, puesto que la fase acuosa contiene siempre algo de electrolito disuelto. Por otra parte, la conductividad de la emulsión depende esencialmente de la naturaleza de la fase continua o externa, puesto que es esta la fase que va a transportar las cargas. En efecto, la fase discontinua no tiene continuidad entre los electrodos. Por lo tanto una emulsión de fase continua agua (con electrolito) O/W posee una alta conductividad, mientras que una emulsión de fase externa orgánica W/O posee una baja conductividad. Esta característica permite deducir inmediatamente el tipo de una emulsión de un dato de conductividad aun bastante aproximado.

- **Voltaje crítico.** Si el voltaje sobrepasa el valor del voltaje crítico para la partícula, ésta puede desintegrarse.

El voltaje crítico se puede expresar por:

$$\sigma = \text{Tensión superficial} \quad V_c = K \times \sqrt{\frac{\sigma}{D}} \quad (20)$$

K= Cte. Dieléctrica

D= Diámetro de la partícula.

Se dispone de reguladores de voltaje para los diámetros de las partículas.

Donde el diámetro de la partícula esta dado por la siguiente ecuación:

$$D_m = 500 \times \mu_o \times 5^{-0.675} \quad (21)$$

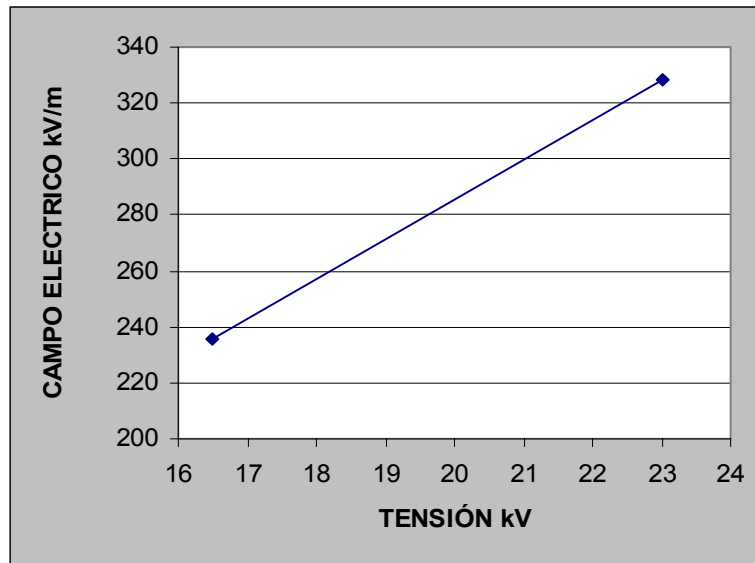
Donde μ_o es la conductividad del petróleo crudo.

- Aplicación de cada una de las características anteriores al Sistema Electrostático del Tratador.

- Cálculo del campo eléctrico aplicado a la mínima y máxima tensión:

$$E_{\min} = \frac{16500}{0,07} = 235,7142 \frac{kV}{m} \qquad E_{\max} = \frac{23000}{0,07} = 328,57142 \frac{kV}{m}$$

Figura 39. Tensión en función del Campo Eléctrico entre placas.



- Calculo de la capacitancia

$$C = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r * S}{d} \qquad (22)$$

Donde la permitividad relativa promedio del petróleo crudo a 158 °F y una frecuencia de 60 Hz es de $\epsilon_r=2,034$ y el are de las placas metálicas o electrodos es de $S=2,52*0,17=0,4284 \text{ m}^2$ y donde la separación de las placas es de $d=0,17 \text{ m}$

$$C = \frac{8,854 * 10^{-12} * 2,034 * 0,4284}{0,17} = 5,36325 \text{ pF}$$

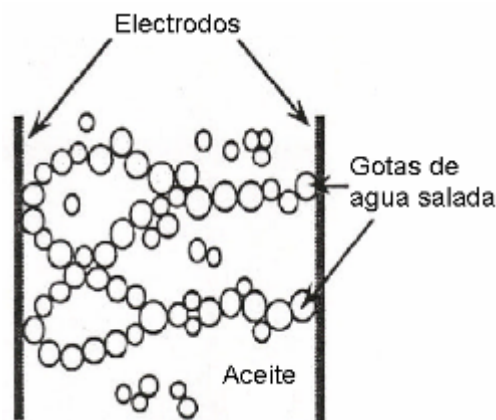
- La energía de las cargas es almacenada, como energía electrostática en el dieléctrico y es igual a:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (23)$$

$$U = \frac{5,36325 * 10^{-12} * 13000^2}{2} = 4,53194625 * 10^4 \text{ FV}^2$$

- Percolación¹⁰**. En ciertos sistemas W/O de alto contenido de fase interna se pueden formar cadenas de gotas de agua entre los electrodos, produciéndose un aumento considerable de conductividad a lo largo de estas cadenas. Este fenómeno llamado percolación que se produce en ausencia de agitación puede contrarrestar el efecto Cottrel en los deshidratadores electrostáticos.

Figura 40. Percolación en emulsiones w/o.



¹⁰ Goldszal, A., Bourrel M. Demulsification of Crude Oil Emulsions: Correlation to Micro-emulsion Phase Behavior. Ind. Eng. Chem. Res., 39:2746-2751 (2000).

- **Sistema de potencia de la sección de coalescencia**

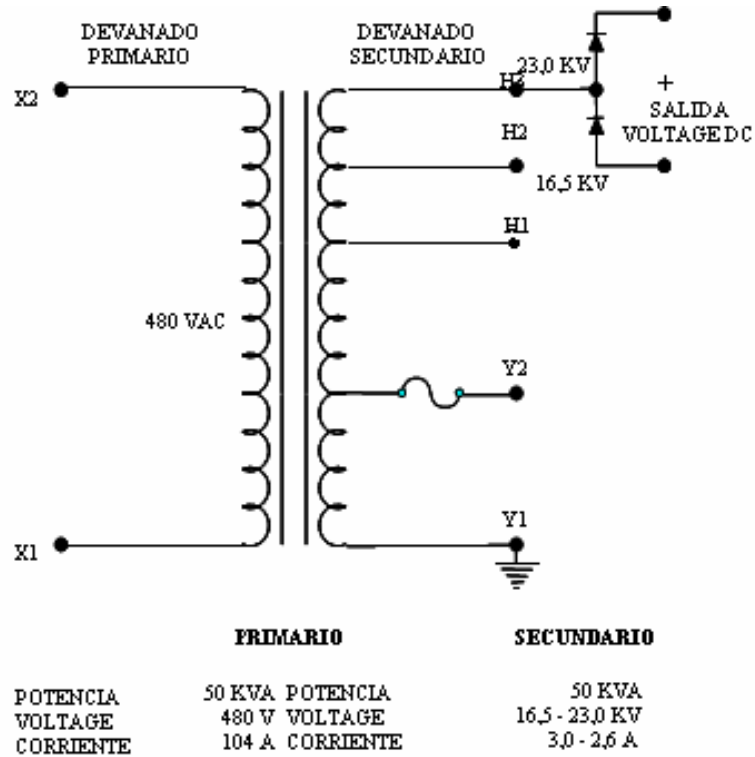
Figura 41. Transformador del sistema de potencia de la Sección de Coalescencia



El Tratador Térmico Electroestático en su sistema de potencia consta de un transformador térmico convertidor de la señal de corriente alterna (AC) a una señal de corriente directa (DC) y alterna (AC), esta conversión de señal la realiza gracias a un sistema de diodos. Este transformador tiene una magnitud de entrada en tensión de 480 V y con una salida que está en un rango entre 16,5-23KV, para la magnitud de tensión de salida consta de un cambia taps para graduar el nivel de tensión requerido, este transformador es denominado transformador elevador, este transformador está diseñado para soportar altas temperaturas y sus devanados se encuentran sumergidos en aceite para su refrigeración, no consta de placas metálicas externas circulantes de aceite debido al calentamiento inducido por el Tratador y sumado a este el calentamiento ambiental. La siguiente figura se muestra el circuito unifilar de dicho transformador.



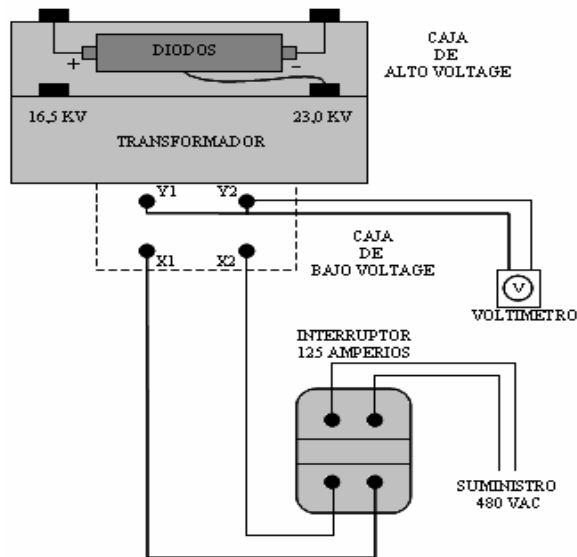
Figura 42. Circuito unifilar del transformador de tensión de doble polaridad del TTE.



El sistema de potencia cuenta con un sistema de puesta a tierra en forma de anillo, la cual es alrededor del TTE, al sistema de puesta a tierra se le realizaron pruebas de fuga las cuales fueron nulas.

Uno de los problemas con que cuenta el sistema de control y medida es que no cuenta con una tierra aislada, por el contrario esta conectada directamente al anillo.

Figura 43. Diagrama unifilar del sistema de control de la Sección Electroestática.



Su relación de transformación esta dada por $n_a=480V/16,5 \text{ KV}=0,029$ y $n_b=480V/23 \text{ KV} =0,02086$.

La corriente de entrada es igual a 87A y la relación de corriente esta dada por $n=l_2/l_1$ por tanto la corriente de salida es igual a $I_a=0,029*87=2,523A$ para una tensión de salida de 16,5 KV y $I_b=0,02086*87=1,81482A$.

Las anteriores corrientes I_a e I_b son el rango aplicado a las placas para el proceso electrostático.



Figura 44. Corriente en función de la Tensión en los electrodos de la Sección de Coalescencia.

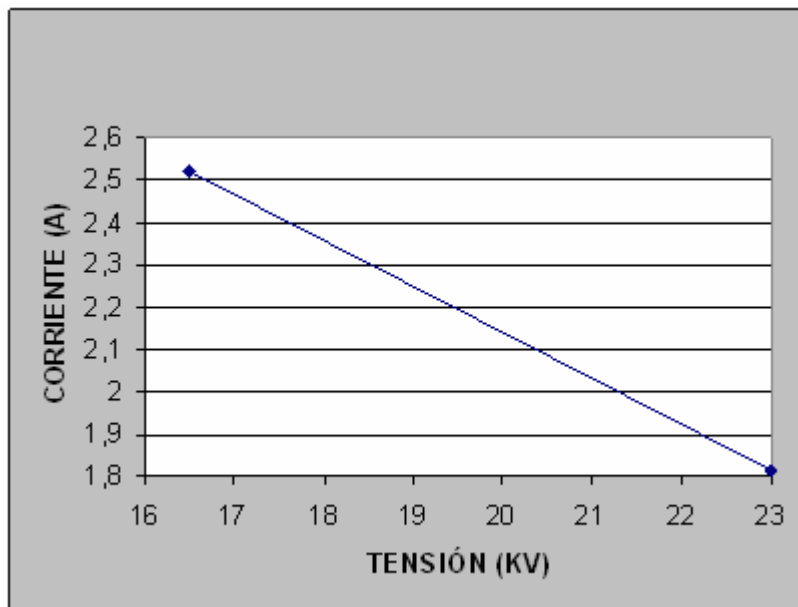


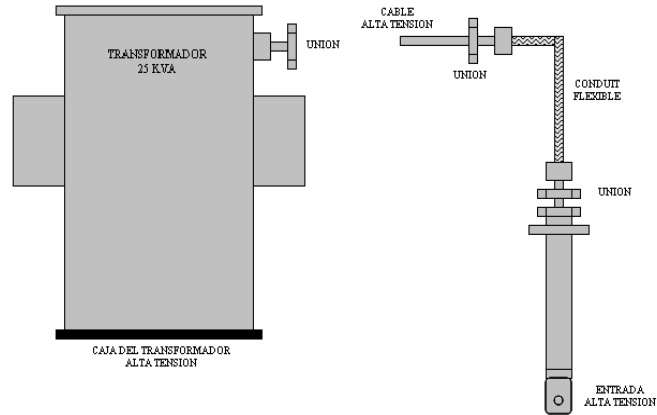
Tabla 6. Potencia y corriente consumida en varios intervalos de tiempo.

KVA	SUMINISTRO VOLTAGE VAC	CORRIENTE NORMAL AMPERIOS	MAXIMA CORRIENTE AMPERIOS	POTENCIA NORMAL KILOVATIOS	POTENCIA MAXIMA KILOVATIOS
5	480	2,08	10,4	0,95	2,49
15	480	6,25	31,25	2,85	7,5
25	480	10,42	52,08	4,75	12,5
50	480	20,83	104,17	9,5	25,0

La anterior tabla muestra el registro de corriente normal y máxima y su respectiva potencia consumida en diferentes intervalos de tiempo, esto se debe a que el crudo no mantiene sus características de forma constante.

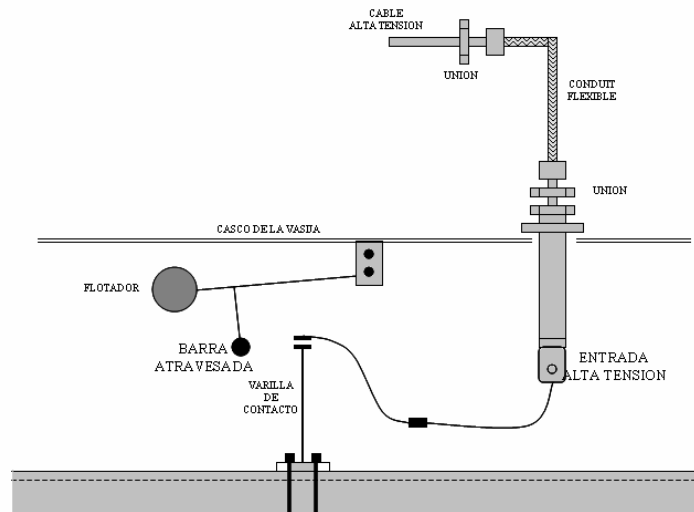
▪ **Conexión del transformador térmico al sistema de placas**

Figura 45. Partes externas que conforman el transformador de tensión.



En la figura anterior se aprecia el transformador de forma externa del cual se desprende dos cables para alta tensión para cada polaridad, tanto la positiva como la negativa, los cuales están protegidos con tubo conduit, donde están diseñados para soportar altas temperaturas, cada cable es conectado al sistema de placas paralelas para la alimentación de dicho sistema.

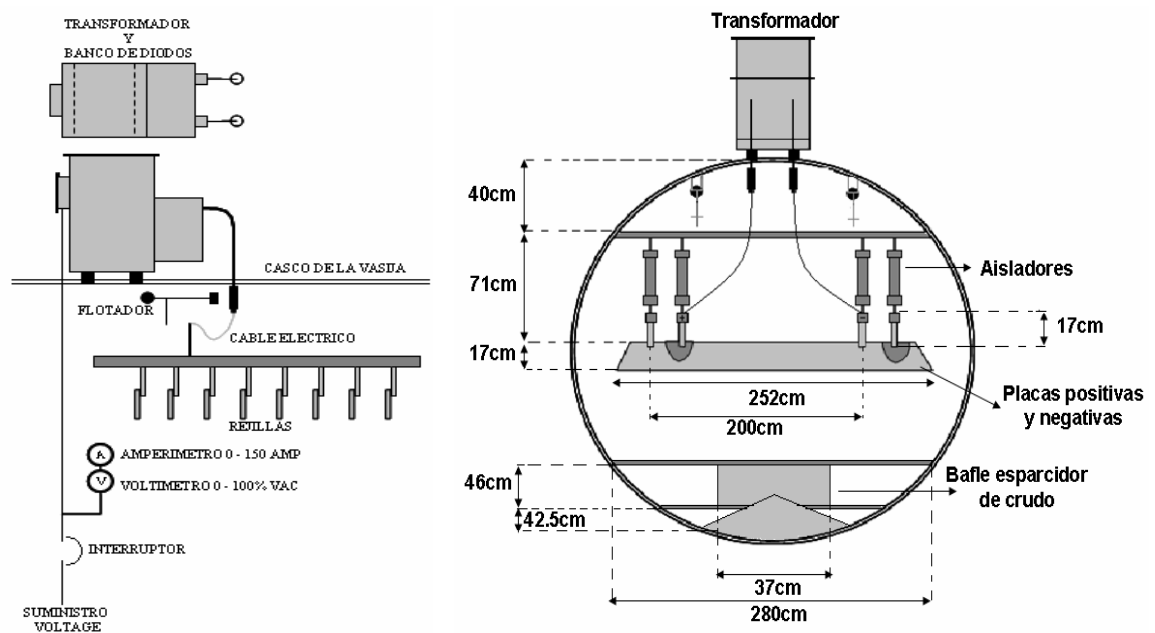
Figura 46. Sistema de desconexión del transformador.



La anterior figura muestra como los cables para alta tensión son conectados al sistema de placas y cuenta con un sistema de control mecánico que desactiva la alimentación por parte del transformador, este sistema mecánico consta de un flotador en forma de bola sostenido de la parte superior interna del casco del TTE. De la barra que sostiene la bola se desprende una barra atravesada que hace el contacto con una varilla conecta o unidad al sistema de placas, en el momento en que hacen contacto las varillas conductoras se desactiva la alimentación al sistema de placas, esto con el fin que la sección de coalescencia trabaje al máximo nivel, debido a que el crudo emerge por la parte superior del casco, hay que aclarar que en todo momento se mantiene arriba por la continua producción.

▪ **Componentes y dimensiones de la Sección de Coalescencia**

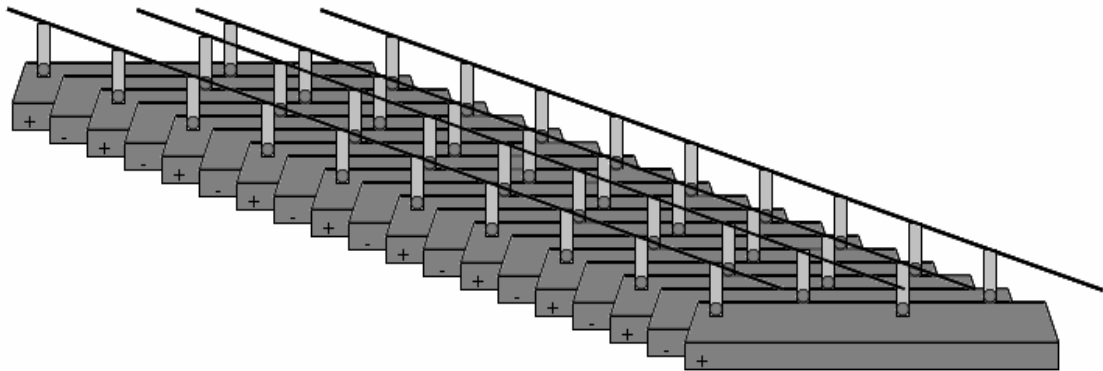
Figura 47. Componentes y dimensiones de la Sección de Coalescencia.



Las anteriores figuras muestran el esquema y medidas que componen la sección de coalescencia, mostrando también el sistema electrostático que hace parte de

esta. Este sistema consta de placas metálicas que actúan como electrodos, estas se encuentran de forma paralela conectadas al sistema de potencia de forma alternada a los polos positivos y negativos, las placas están sostenidas por barras de forma aislada a la parte superior interna del casco del Tratador Térmico Electrostático. En el transformador podemos observar que cuenta con el sistema de medición de tensión y corriente consumida y su respectiva protección (interruptor).

Figura 48. Sistema de placas paralelas.



En la figura anterior podemos observar el sistema de placas paralelas y la forma como están distribuidas. El sistema electrostático consta de 48 placas metálicas de 252 cm de largo con 17 cm de ancho, espaciadas entre si a 7 cm y separadas del bafle espaciador de crudo a 100 cm. Se puede observar las diferentes polaridades de forma alternada para producir la diferencia de potencial para lograr la coalescencia en el petróleo crudo.

Figura 49. Fotografía del control de nivel de la Sección de Coalescencia.



La anterior fotografía muestra el control de nivel, el cual consta de dos sistemas uno forma mecánica y el otro electrónico, que respectivamente son un visor de vidrio (a la izquierda de la fotografía) tipo columna protegido metálicamente donde se puede observar directamente la diferencia de crudo y agua desmulsionada, y el otro es un transmisor de nivel de crudo tipo radar que transmite la señal censada al cuarto de control del operador de turno. También consta de tres salidas a diferentes niveles para la toma de muestras.

6.1.5 Características de diseño del tratador térmico electrostático.¹¹ El diseño del Tratador es muy particular dependiendo de las características del petróleo crudo a tratar, los procedimientos de diseño para la sección de coalescencia no son de forma estándar, debido a que el fenómeno de coalescencia dentro de un campo eléctrico depende de las características particulares de la emulsión, impidiendo obtener una relación general del tamaño de la gota que precipita para ser usada en la ecuación de asentamiento.

¹¹ Harvey R.R.; "The Theoretical Approach to the Investigation of Films Occurring at Crude Oil-Water Interfaces"; Trans AIME. (1960) 219, 350.

El proceso requiere que las gotas de agua que chocan tengan un adecuado tiempo de contacto entre si. Por consiguiente el diseño del Tratador Térmico Electrostático debe tener en cuenta la temperatura, tiempo de retención, viscosidad a la cual debe ocurrir la precipitación.

La sección de entrada se debe diseñar en busca que permita la separación del agua libre y el calentamiento del aceite.

La sección de coalescencia debe proveer un adecuado tiempo de retención para lograr la coalescencia entre las gotas de agua y permitir su precipitación.

- **Ecuación de asentamiento.** El agua es precipitada al fondo del TTE debido a la diferencia de gravedad específica entre las gotas dispersas de agua y el aceite. El régimen de flujo alrededor de una gota de agua que precipita es laminar, por lo cual se puede aplicar la ley de Stokes a este fenómeno.

La velocidad descendente de la gota de agua debe ser lo suficiente para sobrepasar la velocidad ascendente del aceite dentro del TTE. Al igualar la velocidad de asentamiento del agua con la velocidad del aceite se puede derivar la siguiente relación general para el tamaño del TTE:

$$D_i * L_f = \frac{438 * (Q_0 * \mu_0)}{\Delta SG * d_m^2} \quad (24)$$

D_i = Diámetro interno del TTE, (pulgadas)

Q_0 =Tasa de flujo de aceite, (BPD)

L_f = Longitud de la sección de coalescencia

ΔSG = Diferencia en gravedad específica entre el agua y el aceite

d_m = diámetro de la gota de agua que precipita, (micrones)

- **Ecuación del tiempo de retención.** El aceite se debe mantener a una determinada temperatura por un periodo específico de tiempo para romper la

emulsión de agua en aceite. Esta información es mejor determinada en el laboratorio; en ausencia de tal información 20 o 30 minutos es un buen punto de partida. Dependiendo de las condiciones específicas del petróleo crudo a tratar, las dimensiones físicas requeridas para obtener un cierto tiempo de retención pueden ser más pequeñas o más grandes que las dimensiones requeridas para satisfacer la ecuación de asentamiento. En este caso las dimensiones de la vasija se determinan por el mayor de los dos criterios. La ecuación para el tiempo de retención es:

$$D_i^2 * L_f = \frac{T_r * Q_0}{1.05} \quad (25)$$

T_r = Tiempo de retención, (minutos)

Q_0 = Flujo de aceite, (BPD)

D_i = Diámetro interno del TTE, (pulgadas)

L_f = Longitud de la sección de coalescencia

Con la anterior ecuación podemos encontrar el tiempo de retención necesario para lograr una buena deshidratación del crudo en la sección de coalescencia.

Remplazando los datos de la ecuación anterior tenemos:

$$T_r = \frac{D_i^2 * L_f * 1.05}{Q_0} \quad (26)$$

- **Efecto de la temperatura.** El calor reduce la viscosidad del aceite, permitiendo una mayor velocidad de asentamiento según se muestra en las anteriores ecuaciones. Las pruebas de laboratorio para un aceite en particular, constituyen el mejor método para determinar los efectos del calor sobre el aceite. En ausencia de estos datos se pueden utilizar las siguientes ecuaciones de Beggs y Robinson.

$$Z = 3.0324 - 0.02023 * API \quad (27)$$

$$Y = 10^z \quad (28)$$

$$X = Y * T^{-1.163} \quad (29)$$

$$\mu_0 = 10^x - 1 \quad (30)$$

T= temperatura del aceite, (°F)

GAPI= Gravedad API de aceite.

μ_0 = Viscosidad del aceite, (centipoises)

- **Ecuación de flujo de calor.** El calor suministrado y la cantidad de combustible necesario para el tratamiento dependen del aumento de temperatura, de la cantidad de agua en el aceite y de la tasa de flujo. Se requiere casi el doble de energía para calentar una determinada cantidad de agua, que la utiliza para calentar el mismo volumen de aceite. Por esta razón es importante separar el agua libre de la emulsión antes de que esta llegue a la sección de calentamiento. Suponiendo que el agua libre se ha separado de la emulsión, que el agua remanente es menor del 10% y que el Tratador esta aislado para minimizar las perdidas de calor se puede derivar la siguiente ecuación para calcular el calor requerido.

$$q = 15 * Q_0 * \Delta t * (0.5 * SG_0 + 0.1) \quad (31)$$

16= Constante, (BTU/h * 1/BPD*1/°F)

q = Calor de entrada, (BTU/h)

Q_0 = Tasa de flujo del aceite, (BPD)

Δt = Incremento en temperatura (°F)

SG_0 =Gravedad específica del aceite

- **Ecuación del tamaño de la gota de agua que precipita.** Es de esperarse que el tamaño de las gotas de agua aumente en el TTE, debido a que el calor y la acción del campo eléctrico unido al tiempo de retención excitan el sistema y multiplica el número de colisiones entre las pequeñas gotas. Este tamaño de las gotas disminuiría con la viscosidad del aceite, la cual inhibe el movimiento de las partículas y disminuye las fuerzas de colisión. Después de un periodo inicial, el incremento en el tiempo de retención tiene un pequeño impacto sobre el crecimiento de la gota de agua; por consiguiente, para tamaños prácticos de TTE el tiempo de retención no es una variable determinante. Además la viscosidad tiene un efecto mucho más grande que la temperatura sobre la coalescencia. La siguiente ecuación puede entonces ser aplicada:

Diámetro de la gota emulsionada esta dada por la siguiente ecuación:

$$d_m = 500 * (\mu)^{-0.675} \quad (32)$$

d_m = Diámetro de la gota de agua que precipita, (micrones)

μ_0 = Viscosidad de la fase de aceite, (centipoises)

- **Pasos para el diseño del Tratador Térmico Electrostático.** Cuando se diseña un Tratador Térmico Electrostático se debe especificar el diámetro interno, la longitud de la sección de coalescencia y la temperatura de tratamiento. Como se ha visto estas variables son interdependientes y no se puede llegar a una única solución para cada una; el ingeniero de diseño debe optimizar entonces las dimensiones físicas del TTE con la reducción en la temperatura de tratamiento. Las ecuaciones presentes anteriormente permiten obtener unos posibles tamaños en el diseño de TTE, mediante el siguiente procedimiento:

1. Elegir una temperatura de tratamiento.
2. Determine la viscosidad del aceite a la temperatura seleccionada.
3. Calcular el diámetro de la gota a separar del aceite.
4. Determinar el tamaño necesario del TTE para satisfacer la ecuación de asentamiento.
5. Determinar el tamaño necesario del TTE para obtener un adecuado tiempo de retención.
6. Repetir el procedimiento para diferentes temperaturas supuestas.

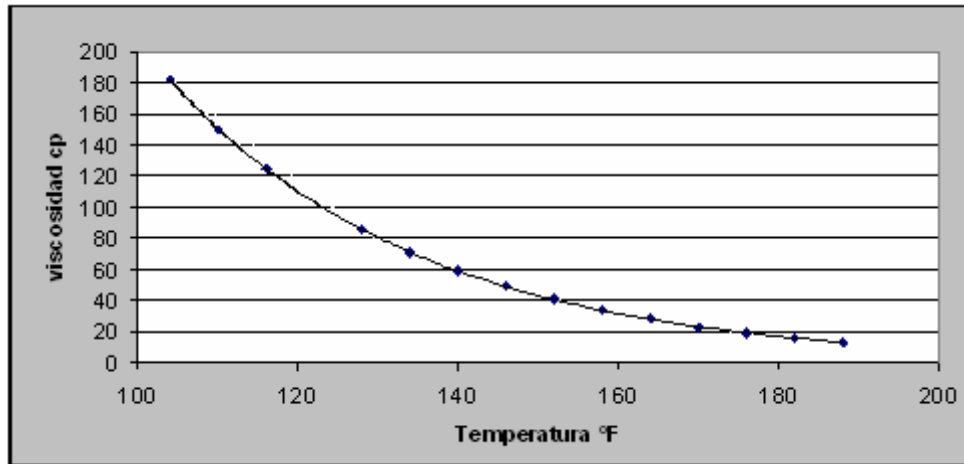
Desarrollo de cada uno de los pasos anteriores:

1. El rango temperatura a la que opera el TTE de la planta deshidratadora de la isla VI del campo Cantagallo en condiciones normales es de 155°F y 165°F y el rango de operación crítica esta entre 140°F y 190°F.
2. Para el calculo de la viscosidad del petróleo crudo del campo Cantagallo contamos con los siguientes datos tomados experimentalmente 111 cp a 122°F y 183 cp a 104°F y aproximamos a la ecuación:

$$\mu = 4672,8 * \lambda^{-0,0312 * T} \quad (33)$$

La cual se representada en la siguiente grafica:

Figura 50. Viscosidad del crudo en función de la temperatura aplicada.



El cálculo de la densidad específica del crudo esta dada por la siguiente ecuación:

$$(34) GE = \frac{141,5}{GAPI + 131,5}$$

La gravedad específica del petróleo crudo del campo Cantagallo es:

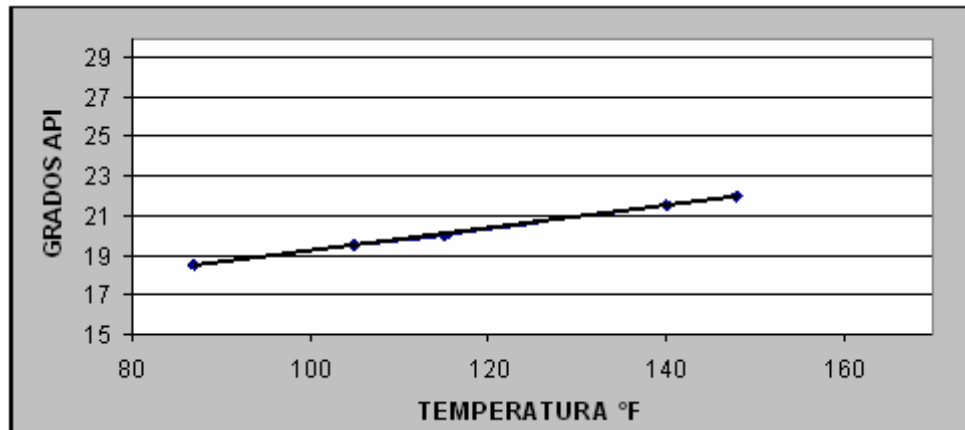
$$GE = \frac{141,5}{20,1 + 131,5} = 0,933$$

La grafica anterior se ajusta a la gravedad específica del crudo del campo Cantagallo.

La siguiente grafica representa la gravedad API del crudo del campo Cantagallo a diferentes temperaturas tomadas de las tablas 5A de conversión de grados API a 60°API de la norma API.



Figura 51. Gravedad API del crudo en función de la Temperatura aplicada.



La grafica anterior se ajusta a la ecuación:

$$^{\circ}API = 0,0574 * T + 13,471 \quad (35)$$

Con un error de $R^2=0,9991$.

La siguiente tabla muestra todos los datos aplicados a las ecuaciones de los ítems anteriores para el diseño del TTE en la sección de coalescencia:

Tabla 7. Características del crudo y aplicación de diseño dependiente de la temperatura aplicada

Temperatura °F	Viscosidad μ en cp	°API	GE	Diámetro de la gota emulsionada mc	Longitud de la sección de coalescencia m
130	80,50455	20,93	0,92829	25,85480	13,27097
140	58,40927	21,5	0,92483	32,10663	5,93444
150	43,09960	22	0,92182	39,41854	2,78404
160	31,53549	22,65	0,91793	48,67212	1,26745
170	23,07416	23,22	0,91455	60,09800	0,58204
PROMEDIO	47,32461	22,06	1,92148	41,23001	4,76778

En la tabla anterior observamos que la longitud promedio de la sección de coalescencia es de aproximadamente de 5m para un diámetro establecido de 3,05m con un tiempo de retención promedio de 3,6407 h

- Aplicación de calor

El crudo sale de los calentadores e ingresa al TTE con una Temperatura de 140°F la cual esta seria la Temperatura de entrada al TTE.

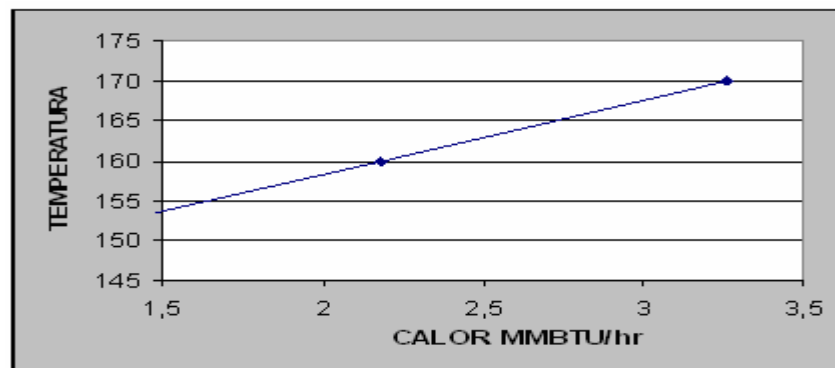
$$q = 15 * Q_0 * \Delta t * (0.5 * SG_0 + 0.1)$$

Tabla 8. Calor requerido para aumentar ha determinado gradiente de temperatura.

Temperatura de tratamiento °F	ΔT (°F)	q (MMBTU/hr)
140	0	0
150	10	1093774,5
160	20	2179963,5
170	30	3260058,75

La anterior tabla muestra las diferentes medidas de temperaturas a la cual el crudo se ve sometido para lograr dichos incrementos de temperatura ΔT.

Figura 52. Incremento de la temperatura en función del calor aplicado.



La anterior grafica representa el calor necesario para el incremento determinado de temperatura para obtener una mejor deshidratación por el sistema electrostático, el calor esta dado en miles de millones de BTU.

6.1.6 Predisposición del sistema de coalescencia para la mejor deshidratación del crudo. En primera instancia se realizo una evaluación del sistema de aislamiento eléctrico del Tratador para descartar fugas de energía, se programó una inspección general del equipo.

Durante la inspección se revisaron los circuitos eléctricos, los sistemas de protección y todos los elementos del equipo que pudieran estar afectando de alguna manera el proceso.

En la inspección se pudo observar que todo se encontraba en buen estado, los circuitos eléctricos, los sistemas de protección y los demás aditamentos con que cuenta el equipo.

Luego del anterior proceso se procedió a realizar las pruebas de deshidratación a diferentes tensiones de salida.

El Tratador Electrostático del campo Cantagallo debido al diseño tiene la distancia entre los electrodos como un valor fijo, el cual corresponde a 7 centímetros.

En cuanto a la tensión aplicada y el tipo de corriente presenta formas de cambio. Las tensiones aplicadas por parte del transformador al sistema electrostático fueron 16,5 KV y 23 KV tanto en AC como en DC.

Durante las pruebas realizadas se mantuvieron constantes los intervalos de temperatura y flujo.

- **Determinación de las mejores condiciones del proceso de deshidratación.**

La determinación de las mejores condiciones de proceso en la planta deshidratadora de la isla VI del campo Cantagallo se realizaron con una variación individual de las variables más influyentes, dentro del proceso de deshidratación electrostática.

Las variables seleccionadas como las más importantes en el proceso fueron:

- Calidad de la carga (BSW)
- Flujo del proceso (m³ph)
- Temperatura del proceso (°F)
- Densidad del Campo Electrostático

Cuatro variables fueron evaluadas dentro de los intervalos permitidos en la planta deshidratadora se determinaron los mejores intervalos de trabajo en forma individual y posteriormente se realizaron pruebas para verificar que los intervalos determinados proporcionaban el mejor rendimiento para el proceso de deshidratación electrostática.

En nuestro caso solo vamos a estudiar una sola variable que es la Densidad del Campo Electrostático.

- **Evaluación de la densidad del Campo Electrostático.** La evaluación de campo electrostático fue un proceso muy interesante ya que poseían muchos parámetros, los cuales podían modificar fácilmente el valor de la densidad de campo.

Los factores que afectan la formación del campo electrostático se observan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Variables internas de la densidad de campo electrostático.

Tipo de corriente	Corriente Directa DC	Corriente Alterna AC
Tensión suministrada (KV)	16,5 y 23	16,5 y 23
Distancia entre electrodos	7 cm. constante	

Durante las pruebas se mantuvieron constantes los intervalos de temperatura y



flujo.

La determinación del mejor intervalo de la densidad electrostática, se realizó evaluando el porcentaje de BSW en el laboratorio químico de la planta deshidratadora de la isla VI.

Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 10. Porcentaje de Deshidratación a diferentes condiciones de corriente AC y DC.

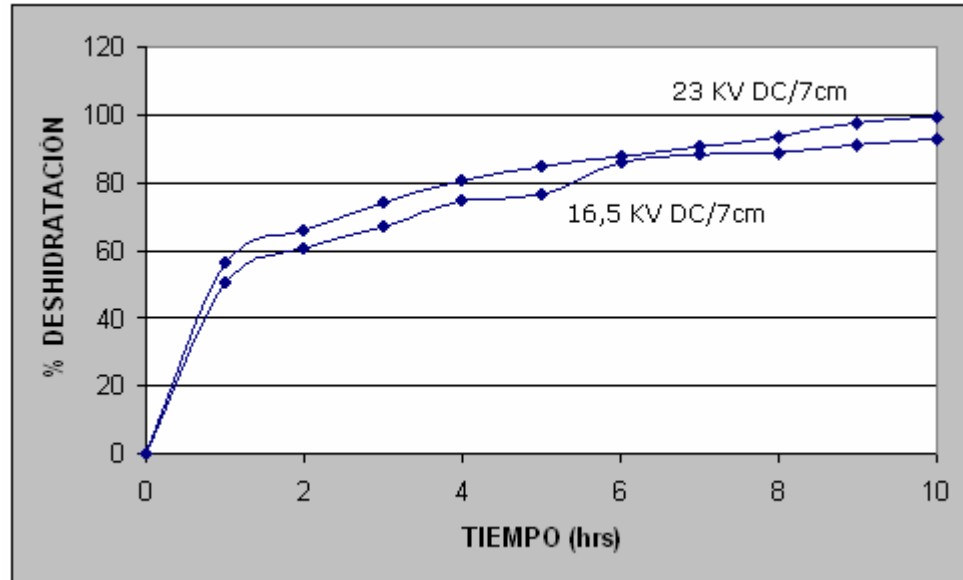
PRESION (PSI)	CORRIENTE (A)	FLUJO (m ³ ph)	TEMPERATURA (°F)	
20	88-92	11.1-12	155-165	
TIEMPO (hrs.)	DENSIDAD DE CAMPO ELECTROSTATICO p (KV/cm)			
	(16,5 / 7) DC	(16,5 / 7) AC	(23 / 7) DC	(23 / 7) AC
	PORCENTAJE DE DESHIDRATACIÓN			
0	0	0	0	0
1	50,3	39,5	56,4	52,4
2	60,4	49,3	65,8	61,6
3	67,1	55,5	74,1	70,5
4	74,8	65,3	80,3	76,6
5	76,7	67,3	84,7	78,8
6	85,8	71,4	87,6	80,2
7	88,3	76,3	90,4	83,5
8	89,1	78,7	93,4	87,6
9	91,2	84,6	97,8	93,3
10	92,9	86,4	99,5	95,6

En la tabla podemos observar que los intervalos de tiempo son de una hora el cual pertenece al tiempo de retención del crudo dentro del Tratador Electrostático.

Los porcentajes dados en la anterior tabla son dados como el porcentaje de crudo libre de BSW.



Figura 53. Diferencia De los mejores resultados de Deshidratación entre corriente DC y AC del Tratador de Cantagallo.



En cuanto al análisis de los resultados obtenidos en la determinación del mejor valor para la densidad de campo electrostático, se concluye que esta emulsión se puede deshidratar con la exposición de un campo electrostático, ya sea producido por una fuente AC o DC, tendiendo a ser mejores los resultados a medida que aumenta la densidad del campo electrostático, teniendo como limite la capacidad del transformador de 23 KV y resultando mejor el campo de DC.

Donde se concluye que la mejor disposición es como está trabajando actualmente el Tratador Térmico Electroestático.

Se realizaron pruebas adicionales para la verificación del proceso las cuales se mantuvieron constantes las variables seleccionadas dentro de los intervalos determinados como los mejores, para así poder comprobar que la interacción de las tres variables evaluadas de forma individual presentan los mejores resultados para la deshidratación electrostática.

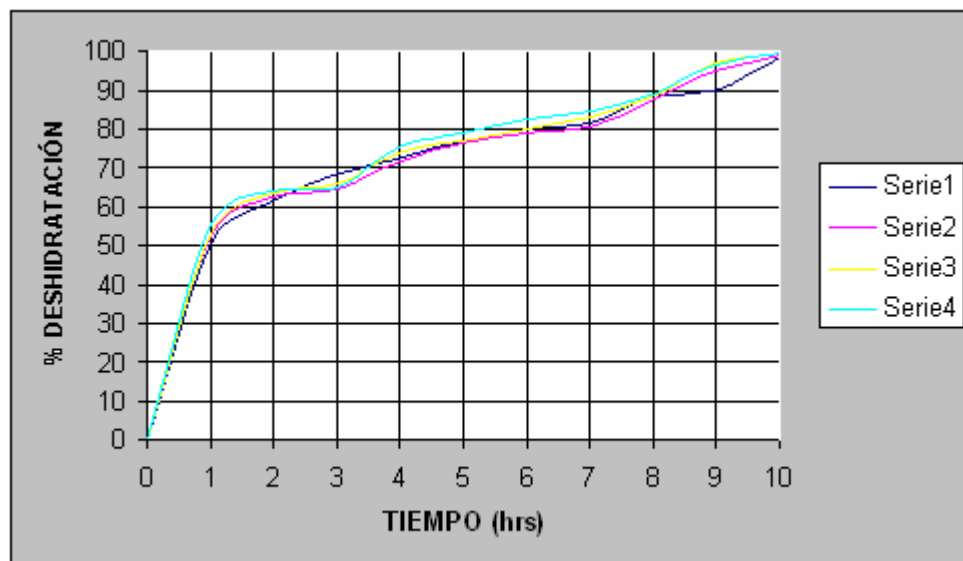
Los resultados de esta verificación se presentan en la siguiente tabla:



Tabla 11. Comprobación de la densidad de campo eléctrico de 23 KV/7cm para el TTE.

FLUJO (m ³ ph)	TEMPERATURA (°F)	D (KV.DC/cm.)	CORRIENTE (A)	PRESION (psi)
11.1-12	155-165	23/7	88-92	20
TIEMPO (hrs.)	1ª Serie	2ª Serie	3ª Serie	4ª Serie
PORCENTAJE DE DESHIDRATACION – %DESH				
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	50.5	52.4	53.2	55.5
2	61.3	62.3	63.5	64.2
3	68.5	64.5	66.2	65.2
4	72.4	71.3	74.2	75.6
5	77.5	76.3	77.2	78.9
6	80.2	79.1	80.2	82.6
7	81.3	80.5	83.2	84.3
8	88.4	87.6	88.7	89.0
9	90.1	95.2	96.9	96.5
10	98.7	99.0	99.3	99.6

Figura 54. Diferentes series de % de deshidratación tomada para la comprobación de la densidad de campo eléctrico estipulado.



Con todos los resultados expuestos anteriormente afirmamos que la mejor tensión aplicada al sistema electrostático es de 23 KV.

6.1.7 Factores que afectan la ejecución de Coalescencia Electrostática¹².

Aunque hay varios factores no eléctricos que afectan la ejecución de coalescencia, tales como el tamaño de la gota, la diferencia de densidad entre las fases, la viscosidad del medio, el radio de las fases, el efecto de la tensión interfacial, el efecto de la temperatura, etc..

Esta sección es relacionada principalmente con los factores concernientes al efecto eléctrico. El mecanismo dominante durante el proceso de coalescencia electrostática probablemente dependerá de tales factores como la demora volumétrica fraccional de la fase esparcida, la geometría del electrodo y la forma y magnitud del campo eléctrico impuesto también como las propiedades eléctricas del sistema. Estos factores han sido basados en la evaluación en términos generales con el parámetro de coalescencia, el cual es definido como:

$$P = \left(\frac{1 - \Delta h}{\Delta h_0} \right) \times 100\% \quad (37)$$

Donde P representa el porcentaje de reducción de la dispersión, el porcentaje de reducción depende de Δh que es la profundidad de la altura de dispersión en la presencia del campo eléctrico y donde Δh_0 es la profundidad de la altura de dispersión en la ausencia de un campo eléctrico.

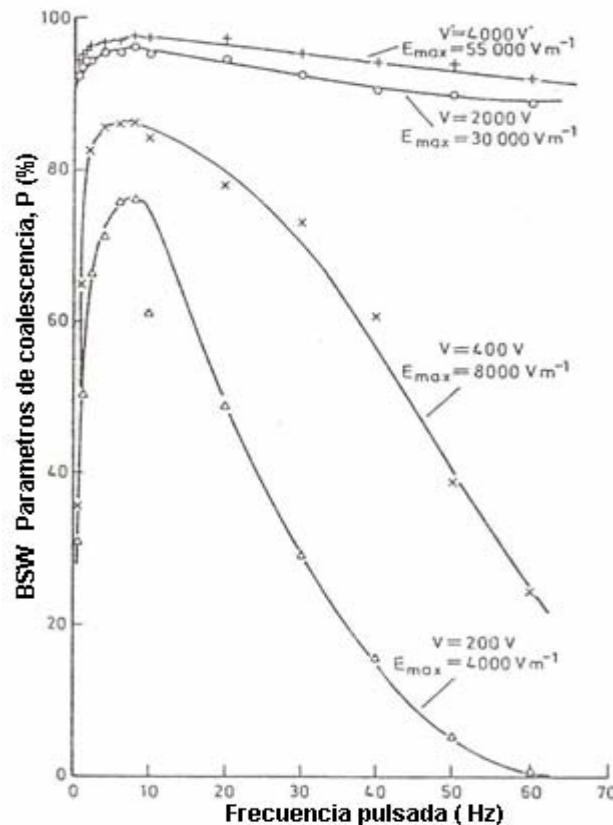
- **Efecto de la frecuencia pulsada.** La ejecución de coalescencia bajo un campo eléctrico pulsado (forma del pulso: media onda u onda cuadrada) es mucho mejor que bajo un campo eléctrico DC. El mecanismo de coalescencia bajo un campo DC constante es diferente del campo pulsado. Los enlaces de gotas se

¹² Arnold J. Kelly, Joseph M. Crowley Handbook of Electrostatic Processes / edited by Jen-Shih Chang. 1995.



forman y se alteran repetidamente bajo los campos pulsados, así las fuerzas son creadas por choques aleatorios llevando a la coalescencia; mientras con la constante de campos DC, una vez el estado estable se logra, los enlaces formados son quizás relativamente permanentes, y los caminos de resistencia baja son creados por carencia de corriente.

Figura 55. Efecto del pulso de frecuencia en el proceso de Coalescencia.



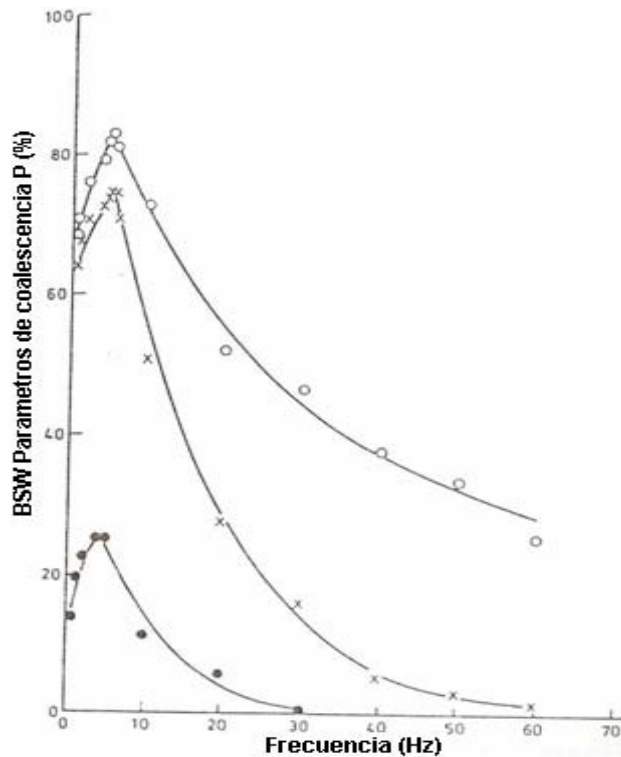
La investigación experimental reveló que hay una frecuencia de pulso óptima en la cual la mejor ejecución de coalescencia puede ser obtenida, como se ve en la figura 55. Esto se nota que el promedio de corriente de conducción además alcanza el nivel más alto a la frecuencia de pulso óptima. Se concluye que el mecanismo de coalescencia electrostática involucra la formación de enlaces de gotas anterior a la coalescencia actual, ya que los enlaces de gotas son



principalmente responsables para la corriente de conducción.

- **Efecto de la fase de radio.** La investigación del efecto de la demora de la fase esparcida sobre la coalescencia electrostática ha revelado que allí existe una demora en la cual la mejor ejecución de coalescencia se puede obtener, así como se muestra en la figura 56. Ellos consideraron que cuando la demora se reduce, las gotas están relativamente lejos y son pequeñas, y esto toma mucho mas tiempo para efectuar el choque y la coalescencia de las gotas a un tamaño lo suficientemente grande para establecerse. Además fue encontrado que para un voltaje aplicado la fuerza del campo decrece rápidamente así como se incrementa.

Figura 56. Efecto de la fase de radio en el proceso de Coalescencia

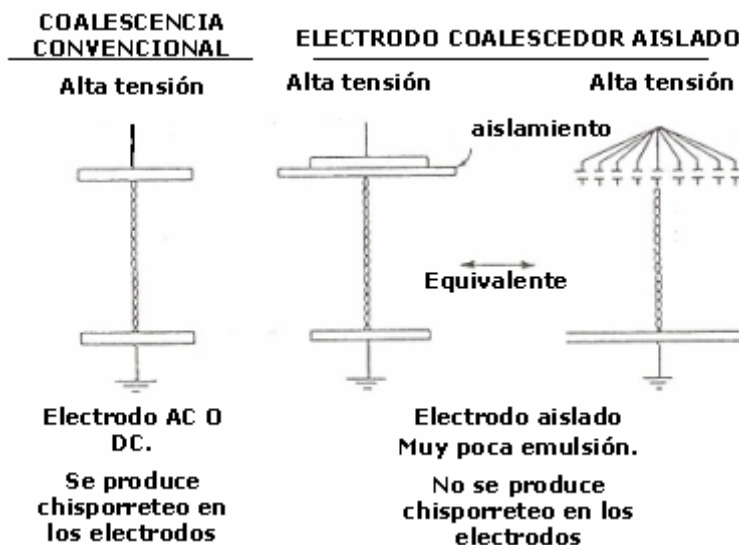


Esto se dirige a la conclusión que allí puede existir un óptimo balance entre la fuerza del campo eléctrico, el tamaño de la gota, el número de gotas por unidad

de volumen, y la separación de la gota por coalescencia electrostática máxima con energía mínima.

- Efecto del cubrimiento del electrodo.** La influencia del cubrimiento del electrodo (electrodo aislado) es otro factor importante para la ejecución aumentada por coalescencia electrostática, especialmente para las aplicaciones en extracción liquido-liquido, donde la demora del líquido está usualmente alta. Como el explicado por Hsu y Li (Figura 58), en un equipo coalescedor con electrodos hechos, si un enlace único sucede para extenderse de un electrodo a otro, empezará a echar chispas. De otro lado, en un coalescedor equipado con electrodos aislantes, la superficie de la cima del electrodo es cubierto con una capa de material aislante que no se moja y no es conductivo. En esta configuración, un enlace formado de agua de conducción es equivalente a un arreglo paralelo de pequeños capacitores independientes; por lo tanto la corriente está además limitada por la reactancia de este pequeño capacitor, y la chispa se extingue.

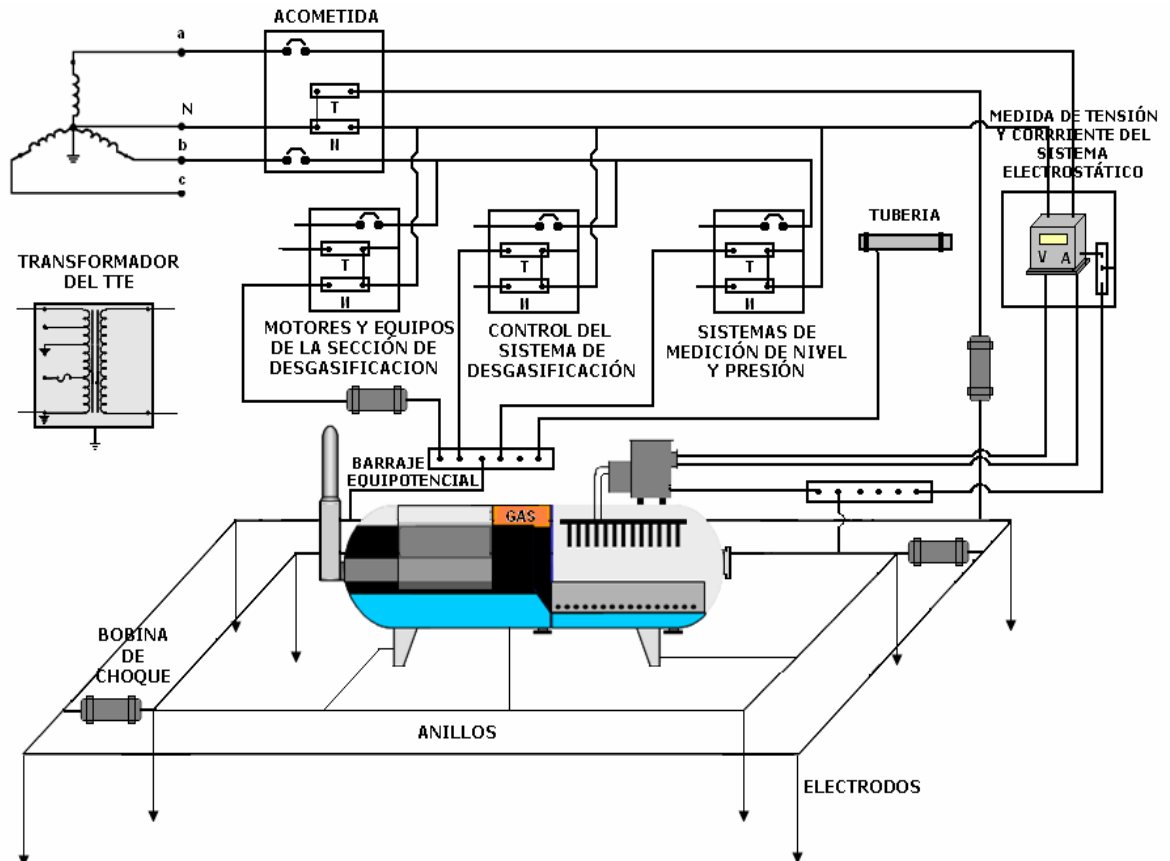
Figura 57. La comparación el convencional y los electrodos aislados para un Coalescedor Electrostático.



Hsu y Li (1985) sugirieron que el medio de cubrimiento sólido de aislante debería ser hidrofóbico y tener una constante dieléctrica por lo menos por encima de 4. Bailes y Larkai (1984) además investigado el efecto del espesor del cubrimiento del electrodo sobre la ejecución de coalescencia. La mejor ejecución de coalescencia se obtiene usando solamente un cubrimiento delgado, a causa de la reducción substancial en la fuerza del campo efectivo en un voltaje aplicado dado. Además el tiempo de relajación interfacial, el cual determina la frecuencia óptima pulsada entre el cubrimiento del electrodo y la capa de fase continua disminuye con el espesor de cubrimiento incrementado.

7. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DEL TRATADOR TÉRMICO ELECTROSTÁTICO

Figura 58. Diseño del sistema de puesta a tierra del TTE.



El esquema anterior muestra una propuesta de diseño del sistema de puesta a tierra del Tratador Térmico Electrostático el cual consiste de un anillo aislado para

El sistema de potencia del Tratador conectado a otro anillo externo donde irán conectados: el control del Sistema de Desgasificación, el sistema de medición de presión y nivel, de dicho Tratador mas la tubería metálica de protección del cableado y equipos y motores de ventilación de la Sección de Desgasificación

estos dos últimos irán unidos junto con los anteriores por medio de una bobina de choque a un barraje equipotencial.

Todas las partes metálicas que hacen parte del Tratador van unidas al anillo interno y la carcasa del transformador de dicho Tratador.

El anillo de tierra consiste en un conductor de cobre desnudo, de sección transversal no menor al calibre 2 AWG (por resistencia mecánica) y enterrado a una profundidad de 800 mm y, que rodee la estructura.

Estos anillos de tierras se emplean para proveer un plano equipotencial alrededor del equipo.

La razón de las tierras independientes es con el fin que a los equipos sensibles no lleguen perturbaciones provenientes del sistema de potencia del Tratador y del sistema Eléctrico nacional, utilizando en su separación bobinas de choque, estos sistemas son inseguros para el personal y perjudiciales para los componentes eléctricos.

En el caso de tanques con recubrimiento no conductor, y donde se tiene instrumentación, se recomienda tener electrodos de instrumentación con puesta a tierra (Ground Loop Interrupt), para evitar que las cargas fluyan a través de electrodos y circuitos electrónicos causando lecturas falsas y reduciendo la vida útil de los electrodos.

7.1 RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA DEL SUELO

La resistividad eléctrica ρ del suelo representa la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual forma se puede definir la conductividad como la facilidad al paso de la corriente por el suelo. La resistencia eléctrica viene determinada por la resistividad del suelo y su geometría. Al considerar el suelo como un conductor rectilíneo de sección S y de longitud L , su resistencia eléctrica y resistividad son:

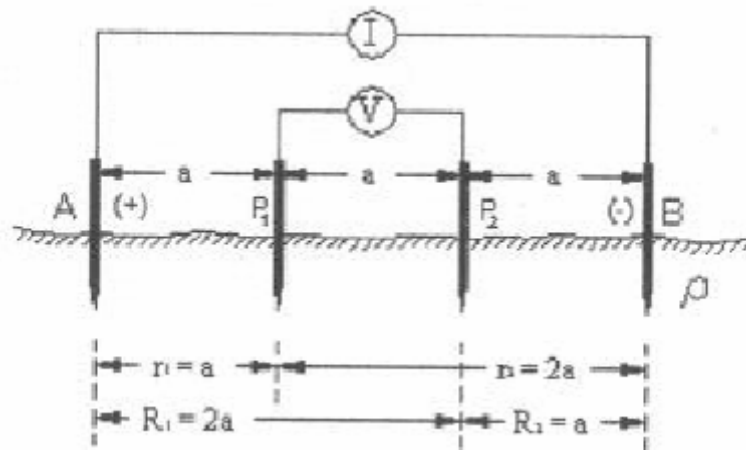


$$R = \rho \frac{L}{S} \Rightarrow \rho = \frac{RS}{L} \quad (38)$$

7.2 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO

7.2.1 Método de Frank Wenner. Este método, se basa en la aplicación del principio de caída de potencial, donde se toma electrodos (A, P₁, P₂ y B), ubicados sobre una línea recta, separados a igual distancia "a" entre ellos.

Figura 59. Método de Wenner.



Siendo su resistividad:

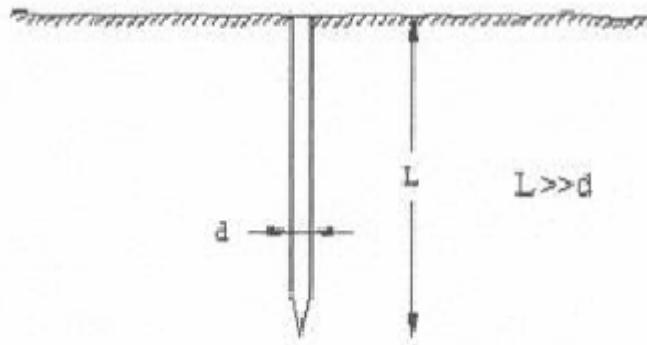
$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi \frac{Va}{I} = 2\pi Ra \quad (39)$$

7.2.2 Selección e instalación del electrodo. El electrodo es el componente del sistema de puesta a tierra que está en contacto directo con el suelo y proporciona el medio para botar y recoger cualquier tipo de fuga de corriente a tierra, el electrodo debe tener buena conductividad eléctrica y no corroerse dentro del

suelo; el más utilizado es el cobre electrolítico de pureza 99.9%. El electrodo puede tomar diversas formas: barras verticales, conductores horizontales, placas y otros. En nuestro diseño utilizaremos el electrodo vertical en pozo, son los más que se aplican por el mínimo espacio que ocupan, se usa un electrodo simple tipo varilla de cobre, siendo las medidas estándar, para su longitud L : 2, 2.5, 3m, diámetro d : 0.025m y 0.013m, siendo su resistencia:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \quad (40)$$

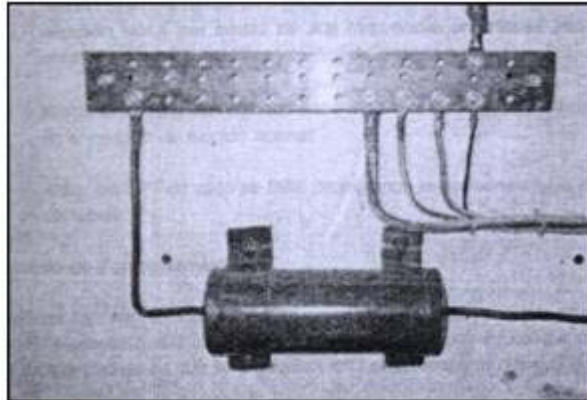
Figura 60. Electrodo vertical.



7.3 LA BOBINA DE CHOQUE

Es un arrollamiento de cables sobre un cilindro, en cual cada espira reduce un campo magnético. Como estos campos elementales interfieren entre sí, se produce un fenómeno de autoinducción que tiene por efecto crear que en la bobina una corriente inducida, que se opone al paso de la corriente original, causando un retraso de la corriente respecto al voltaje.

Figura 61. Bobina de choque conectada al barraje equipotencial.



La inductancia es la propiedad de un circuito de presentar oposición al cambio del flujo magnético que lo atraviesa. Es decir, que al cortar la corriente bruscamente, pareciera que la energía cinética de los electrones se convirtiera en campo magnético. Se define como la relación entre los enlaces de flujo y la corriente que los produce.

El flujo φ abrazado por la bobina es proporcional a la corriente I .

$$\varphi = L * I \quad (41)$$

En esta última expresión L es un coeficiente constante que recibe el nombre de coeficiente de autoinducción, inductancia propia o inductancia de bobina. Este coeficiente de autoinducción es siempre positivo.

8. CONCLUSIONES

- En el levantamiento del Tratador se logro tomar todos los datos que hacen parte de todos los equipos que conforman el Tratador y las dimensiones y características de la vasija, se pudo observar que la Sección de Desgasificación se encuentra sobre dimensionada en equipos mas exactamente en las electroválvulas y se presentan frecuentemente dificultades con la expulsión de la llama a los tubos de fuego, se concluyo que esta dificultad se presenta por el taponamiento de las vías del gas que es quemado, debido a que este gas posee partículas de crudo en pocas palabras es un gas sucio.
- Se logro conocer como afecta el diseño de las placas en la coalescencia del crudo, en la forma como estén dispuestas, la separación entre dichas placas y si están aisladas o no, todo esto afecta las condiciones eléctricas y magnéticas, el Tratador de Cantagallo cuenta con placas de forma vertical donde el campo eléctrico es de forma paralela al nivel de crudo y en caso de bajo nivel se mantiene parte del campo eléctrico dentro de este, esta es la mejor disposición debido que en condiciones de bajo nivel cuenta con sumergir el par de electrodos, lográndose así la coalescencia.
- Se consiguió un proceso de evaluación de trabajo del Tratador Térmico Electrostático del campo Cantagallo y se concluyo que dicho Tratador esta en muy buenas condiciones y que en condiciones normales de flujo, temperatura, presión y amperaje cumple con una muy buena eliminación de BSW y que la mejor señal de tensión aplicada a los electrodos es la DC.
- El crudo presenta características especiales debido a la formación de la emulsión tratada, la cual posee propiedades particulares tales como alta cantidad

y diversidad de sólidos y densidades etc. Estas propiedades cambian bruscamente y constantemente dependiendo del sitio y de la altura a la cual se tome la emulsión y del tiempo atmosférico, todo esto debido a que dicha emulsión se formo por el deposito indiscriminado de todo tipo de residuos orgánicos.

- Se trabajo con diferentes densidades de campo eléctrico el cual se consiguió variando la magnitud forma de señal de la tensión aplicada al sistema electrostático, tomándose datos de BSW y se concluyo que la mejor disposición es en un campo DC A 23kv donde se consiguió la mejor deshidratación.
- En el diseño de puesta a tierra solo se logro dar un esquema del diseño de puesta a tierra, recomendaciones, métodos de la medida de la resistencia del suelo y el electrodo recomendable para dicho sistema, debido a que no se pudo contar con el préstamo de equipos por parte de Confipetrol para la medida de la resistividad del suelo,
- Se recomienda implementar en el proceso de Deshidratación Electrostática un equipo que permita la variación de la distancia entre electrodos, la aplicación de frecuencia pulsada y el recubrimiento de los electrodos con cerámica, estableciendo una alternativa interesante en el proceso, teniendo en cuenta que el aumento en la densidad del Campo Electrostático aumenta el rendimiento de la Deshidratación.

BIBLIOGRAFÍA

GOLDSZAL, A., BOURREL M. Demulsification of Crude Oil Emulsions: Correlation to Micro-emulsion Phase Behavior. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39:2746-2751. 2000.

GUZMÁN C., RAMOS L.R., MORATAYA C., LAYRISSE I. Criterios para el Diseño Conceptual de Procesos de Deshidratación/Desalación Electroestática. *Revista Visión Tecnológica* Vol. Nº 3, 35-43. 1996.

HIRATO T., KOYAMA K., TANAKA T., AWAKURA Y., MAJIMA H. Demulsification of Water-in-Oil Emulsión by an Electrostatic Coalescence Methodology. *Mater. Trans.* 52, 257. 1991.

KELLY, Arnold J.; CROWLEY, Joseph M. *Handbook of Electrostatic Processes* / edited by Jen-Shih Chang. 1995.

LAYRISSE I., CHIRINOS M.L., ESLAVA M., MÉNDEZ F. Deshidratación y Desalación de Crudos pesados y extrapesados mediante Separadores Electroestáticos. VII Jornadas Técnicas de Petróleo. Sociedad Venezolana de Ingenieros de Petróleo, Dic. 3-6, Caracas. 1984.

NARIÑO, Freddy. Ingeniero de Petróleos UIS y docente de la Universidad Industrial de Santander, jefe de la isla VI del Campo Cantagallo de ECOPETROL.

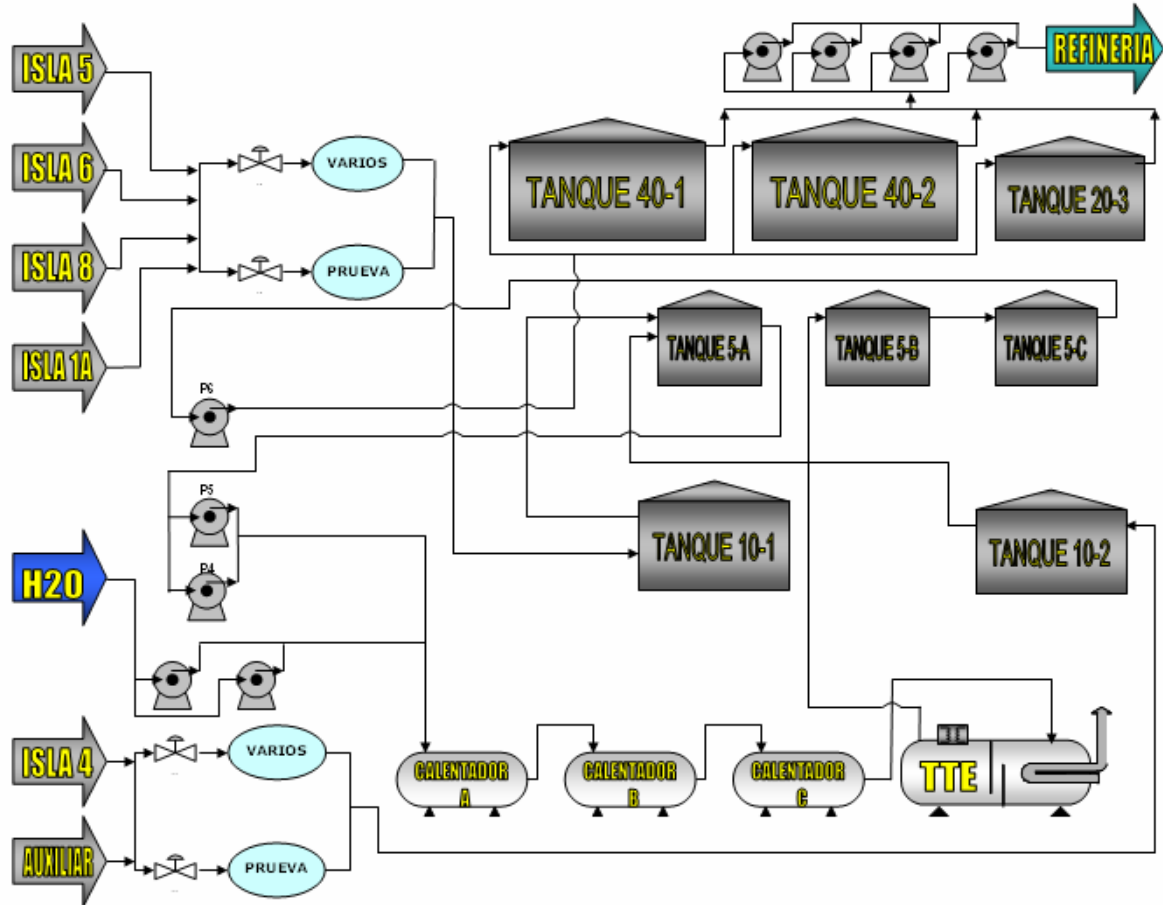
QUIÑONES, Emil. Ingeniero Electrónico, Ingeniero de soporte de instrumentación electrónica de CONFIPETROL.

SALAGER J.L. Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte A: Introducción y

conceptos de formulación fisicoquímica. Cuaderno FIRP 747-A, Módulo de enseñanza en Fenómenos Interfaciales, Laboratorio FIRP, Universidad de los Andes, Mérida. 1999.

ANEXOS

Anexo A. Esquema del proceso de deshidratación en la Planta Deshidratadora de la Isla VI del Campo Cantagallo



Circuito del sistema de Deshidratación de crudo del campo Cantagallo

Anexo B. Problemas operacionales

❖ Alta presión

La presión en el tratador puede aumentar por problemas en las válvulas de control de fluido y presión, y/o del depurador de gas de la estación (por ejemplo taponamiento u obstrucción), o por bloqueo de la línea de alivio de gas de la estación a la tea. Si la presión en el tratador es tal que impida el flujo desde la descarga de la bomba P-5, se debe entonces disminuir hasta su valor normal para que exista flujo y de esta forma evitar daños operativos en los equipos de bombeo, presencia de crudo en la línea de gas o disparo de las válvulas de seguridad del tratador. Como una medida de protección adicional se tiene instalada una línea de 1½ Pulgadas y una válvula de control auto-regulada, con un punto de ajuste de presión ligeramente superior al punto de ajuste del switch de alta presión del tratador de manera que si la presión sigue aumentando esta válvula se acciona dejando pasar el exceso de gas hacia el API por las líneas de los drenajes.

❖ Problemas en la válvula de control de presión

Cuando la válvula de control de presión (PV-601) en la salida de gas hacia el depurador presenta fuga de gas, o cuando se encuentra obstruida impidiendo el flujo de gas del recipiente, lo cual ocasiona su presurización, se puede by-pasear la válvula de control y configurar el punto de ajuste de la válvula de manejo de sobre-presión a la presión de operación del tratador, si esto no funciona, es necesario tratar de regular en forma manual la presión en el tratador mediante el by-pass de la válvula de control. Si no se tiene éxito de esta forma es necesario by-pasear el tratador hasta que se repare la válvula; siendo necesario en ambos casos avisar al grupo de Instrumentos oportunamente para que reparen la(s) válvula(s) de control afectadas.

❖ **Alto nivel de fluido en el tratador**

El aumento del nivel de fluido en el TTE generalmente se debe al crudo emulsionado que llega proveniente de los tanques de proceso. Es necesario determinar la causa de esta emulsión para tomar los correctivos necesarios con el fin de eliminarla. Esto puede ser disminuyendo total o parcialmente la tasa de bombeo del flujo de crudo hacia la estación (desde las estaciones de recolección, por ejemplo) o aumentando la inyección de químico. En este caso se debe abrir entonces el by-pass de fluido del tratador y mantenerlo así hasta que se normalice el nivel. Si es necesario se puede disminuir el nivel de agua en las secciones de calentamiento y/o coalescencia, mediante la operación manual de la válvula de control o los respectivos "by-pass". Si la corriente de entrada al transformador que alimenta la sección electrostática es mayor de 80 amperios, se debe sacar esta de servicio para evitar que se queme el transformador. Si el nivel de fluido del tratador permanece alto y llega a pasar a la línea de gas se hace necesario abrir lentamente el by-pass que lo saca de servicio, para mandar la producción al tanque de almacenamiento. Como este crudo no reunirá las condiciones de calidad requeridas, se recomienda hacer cambio de tanque de recibo para no afectar el crudo adecuadamente tratado que ya se encuentra en los tanques de almacenamiento. Cuando la situación haya desaparecido se procede a normalizar la operación del tratador y la estación.

❖ **Problemas en las válvulas de control de fluido y de los drenajes**

Estas válvulas pueden presentar taponamiento, haciendo que los niveles respectivos aumenten, o pueden presentar paso haciendo que estos niveles disminuyan. En el primero de los casos se debe tratar de mantener el nivel mediante la apertura del "by-pass" de la respectiva válvula de control. En el segundo caso se debe bloquear la válvula de bola anterior o posterior a la válvula de control, para evitar la caída de nivel, y operar en forma manual mediante el respectivo by-pass. En las dos situaciones se debe dar pronto aviso a

Instrumentos para que se encarguen de la reparación de la(s) válvula(s) de control.

❖ **Taponamiento de las líneas de drenajes**

Esto sucede como consecuencia de la acumulación de sedimentos, (lodo y arena) en las líneas de drenaje, y ocasiona un aumento en los niveles. Es necesario verificar que todo el sistema de control se encuentra en buen estado antes de diagnosticar el taponamiento de la línea. El procedimiento a seguir en este caso es el siguiente:

1. Bloquear la comunicación de la línea de los drenajes con el API y la sección del TTE que no se encuentra tapada.
2. Abrir la válvula de control y el "by-pass" de la línea taponada.
3. Conectar a línea de drenaje tapada con el sistema el contra-incendios utilizando mangueras y acoples rápidos.
4. Abrir completamente la válvula de la línea de contra-incendios para que fluya el agua.
5. Repetir el procedimiento de ser necesario.

❖ **Mal funcionamiento de los transmisores de nivel**

Los transmisores de nivel pueden funcionar mal debido a la presencia de emulsiones o al deterioro de los mismos; los transmisores pueden descalibrarse o enviar señales erróneas debido a daños en su parte interna. En estos casos los transmisores no pueden diferenciar correctamente las interfases, haciendo que el controlador reciba señales falsas por lo cual puede pasar crudo al API, o aumentar los niveles en el recipiente. Si la causa de esta anomalía es la presencia de emulsión, se debe entonces pasar esta emulsión a un tanque de crudo de

almacenamiento para recircularla posteriormente, y tratar de mantener los niveles adecuados mediante operación en modo manual y/o utilizando el by-pass respectivo. Si el problema es del transmisor de nivel, se debe entonces informar a Instrumentos para que haga el respectivo mantenimiento. Si el problema es de la sonda puede estar causado por disminución de la temperatura en el fluido, por lo tanto antes de realizar cualquier diagnostico se debe retirar y limpiar el transmisor de nivel.

❖ **Problemas en la Sección Electrostática**

La sección electrostática puede quedar fuera de servicio debido a un alto nivel de agua en la zona de coalescencia, lo que causa un incremento en el amperaje del transformador. En este caso se debe revisar el nivel de agua de coalescencia en el visor correspondiente (LG-602), y normalizarlo mediante la válvula de control y/o el by-pass. Cuando este nivel sea el adecuado se intentará colocar la sección electrostática en servicio, mediante el interruptor ubicado en el gabinete de potencia de la subestación, reseteando el relé térmico que se encuentra instalado sobre el contactor. Si esta sección no entra en servicio, se debe entonces revisar la sección electrostática utilizando los instrumentos (Amperímetro y voltímetro), ubicados en el gabinete de los quemadores. El amperaje que se indique allí debe ser menor de 80 amperios, y el voltímetro debe indicar un valor de aproximadamente 460 Voltios. Además el bombillo ubicado en la parte superior del gabinete debe estar encendido, indicando que el transformador tiene señal eléctrica de entrada. Si no es así; es posible que exista alguna anomalía en el circuito de alimentación al transformador, por lo cual se debe avisar el turno eléctrico para que revisen este sistema.