

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA ELECTROMÉTRICA PARA  
DETERMINAR EL CONTENIDO DE SAL EN CRUDOS

ALEXANDRA VANESSA LOZADA VALBUENA  
JORGE ARMANDO RODRIGUEZ HERNANDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA

2010

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA ELECTROMÉTRICA PARA  
DETERMINAR EL CONTENIDO DE SAL EN CRUDOS

Trabajo para optar el título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Autores:

ALEXANDRA VANESSA LOZADA VALBUENA  
JORGE ARMANDO RODRIGUEZ HERNANDEZ

Director:

ING. CESAR AUGUSTO PINEDA GÓMEZ

Ingeniero de petróleos

Escuela de Ingeniería de Petróleos-UIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS  
BUCARAMANGA

2010

## DEDICATORIA

*A Dios por brindarme la oportunidad de existir, acompañarme y guiar cada paso en mi camino.*

*A mi madre, hermano y abuelita quienes comparten su amor conmigo y estuvieron junto a mí apoyándome en todo momento.*

*Alexandra Vanessa Lozada Valbuena*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos especialmente a la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería de Petróleos por haber aportado en nuestra formación como profesionales.

Agradecemos a nuestro director de proyecto el Ing. Cesar Augusto Pineda Gómez por su apoyo, paciencia, disposición y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A Mario Torres por su conocimiento y experiencia brindados en cada etapa de nuestro proyecto.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron y aportaron sus conocimientos y tiempo para la realización este trabajo.

**Los autores**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	22
1.1 GENERALIDADES Y CONCEPTOS	25
1.2.1 Realización de réplica	29
1.2.2 Aleatorización	30
1.2.3 Control Local	32
1.3 MODELOS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS	33
1.3.1 Diseños unifactoriales.	33
1.3.2 Diseños por bloques	33
1.3.3 Diseños Factoriales	33
1.3.4 Otros diseños.	34
2. FUNDAMENTO TEÓRICO PARA LA MEDICIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA	35
2.1 CORRIENTE ELECTRICA	35
2.1.1 Corriente alterna	36
2.1.2 Corriente Directa	37
2.2 CIRCUITOS	38
2.2.1 Circuitos en Serie	38
2.2.2 Circuitos en Paralelo	39
2.2.3 Resistividad	39
2.2.4 Conductividad	41
2.2.5 Ley de OHM	42
2.3 CONDUCTIVIDAD DE SUSTANCIAS	44
2.4 HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN	46

2.5 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD	48
3. CARACTERIZACION DE LAS EMULSIONES	52
3.1 DEFINICIÓN DE EMULSIÓN Y FORMACIÓN DE EMULSIONES	52
3.1.1 Factores estabilizantes que contribuyen a mantener una emulsión	54
3.1.2 Medida de la estabilidad	56
3.2 TIPOS DE EMULSIONES	57
3.2.1 Emulsión agua en petróleo	58
3.2.2 Emulsión petróleo en agua	59
3.3. TRATAMIENTO DE CRUDO EMULSIONADO	60
3.4. ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE SAL EN CRUDOS	63
3.4.1.Método Aruba (Método de MOHR).	65
3.4.2 Método Electrométrico (Norma ASTM D 3230)	70
3.5 PROCESO DE DESALACION DE CRUDO	79
4. PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA ELECTROMÉTRICA	83
4.1.2 Circuitos Elaborados	85
4.1.3 Medición de corriente y voltaje en el equipo	86
4.2 COMPONENTES DE LA CELDA DE PRUEBA	88
5. DESARROLLO DEL PROYECTO	90
5.1 FASE I	90
5.2 FASE II	91
5.3 FASE III	92
5.4 FASE IV	96
5.5 FASE FINAL	98
6. ANALISIS DE RESULTADOS	100
6.1 FASE I	100
6.2 FASE II	102
6.3 FASE III	105
6.4 FASE IV	120
6.5 FASE FINAL	121

7. CONCLUSIONES	123
8. RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFIA	126
ANEXOS	127

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Modelo general de un proceso o sistema	23
Figura 2. Principios de diseño de experimentos (Fisher, 1926)	29
Figura 3. Diagrama de Flujo. Diseño de Experimentos.	31
Figura 4. Circuito Eléctrico.	35
Figura 5. Corriente Alterna	36
Figura 6. Corriente Directa.	37
Figura 7. Circuito En Serie.	38
Figura 8. Circuito en paralelo.	39
Figura 9. Símbolo de Resistencia.	40
Figura 10. Representación de Voltaje y resistencia.	44
Figura 11. Conexión Amperímetro.	47
Figura 12. Conexión de voltímetro.	48
Figura 13. Método de los dos puntos.	49
Figura 14. Método de los cuatro puntos.	50
Figura 15. Estimación de agua emulsionada contenida en crudo	59
Figura 16. Métodos de Determinación de sales.	63
Figura 17. Cilindro metálico con émbolo.	68
Figura 18. Centrífuga.	68
Figura 19. Esquema principal del Proceso de desalación.	81
Figura 20. Método y aparato para determinación de la cantidad de sal en hidrocarburos líquidos.	84
Figura 21. Aparato para método electrométrico.	84
Figura 22. Circuito de corriente directa.	85

Figura 23. Circuito corriente alterna.	85
Figura 24. Circuito Definitivo de la herramienta Electrométrica.	86
Figura 25. Multímetros digitales	87
Figura 26. Celda de Prueba.	88
Figura 27. Celda de Prueba.	89
Figura 28. Optimización del tiempo en el procedimiento.	91
Figura 29. Muestra de Crudo elaborada.	94
Figura 30 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 25 VAC con tiempo de 0 min.	104
Figura 31 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 25 VAC con tiempo de 5 min.	104
Figura 32. Equipo elaborado para la determinación de contenido de sal en crudo.	105
Figura 33 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 5 VDC con tiempo de 0 min.	106
Figura 34 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 5 VDC con tiempo de 5 min.	106
Figura 35 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 10 VDC con tiempo de 0 min.	107
Figura 36 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 10 VDC con tiempo de 5 min.	107
Figura 37 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 20 VDC con tiempo de 0 min.	108
Figura 38 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 20 VDC con tiempo de 5 min.	108
Figura 39 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 9 VAC con tiempo de 0 min.	109
Figura 40 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 9 VAC con tiempo de 5 min.	109

Figura 41 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 25 VAC con tiempo de 0 min.	110
Figura 42 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 25 VAC con tiempo de 5 min.	110
Figura 43 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 50 VAC con tiempo de 0 min.	111
Figura 44 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 50 VAC con tiempo de 5 min.	111
Figura 45 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 120 VAC con tiempo de 0 min.	112
Figura 46 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 120 VAC con tiempo de 5 min.	112
Figura 47 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 0.5 % de <b>H2O</b> .	113
Figura 48 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 2.5 % de <b>H2O</b> .	113
Figura 49 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 5 % de <b>H2O</b> .	114
Figura 50 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 10 % de <b>H2O</b> .	114
Figura 51 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 20 % de <b>H2O</b> .	115
Figura 52 Concentración de Sal Vs conductividad para 120 VAC.	116
Figura 53. Línea de Tendencia 120 VAC y 2.5 % de agua	116

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Muestras Estándar.	76
Tabla 2. Escalas de voltímetros y Amperímetros.	87
Tabla 3. Datos de Calibración con aditivos del procedimiento.	90
Tabla 4. Cantidad de Solución Salina en la muestra.	95
Tabla 5. Tabla para toma de datos.	96
Tabla 6. Toma de datos Método de MOHR.	97
Tabla 7. Tabla de datos. Fase Final.	98
Tabla 8. Conductividad del agua desmineralizada.	100
Tabla 9. Conductividad de Solventes No Polares.	101
Tabla 10. Conductividad del Solvente Polar.	102
Tabla 11. Conductividad de Crudo Base.	103
Tabla 12. Datos de Desviación Estándar para 0.5 % de agua.	118
Tabla 13. Datos de Desviación Estándar para 2.5 % de agua.	118
Tabla 14. Datos de Desviación Estándar para 5 % de agua.	119
Tabla 15. Datos de Desviación Estándar para 10 % de agua.	119
Tabla 16. Datos de Desviación Estándar para 20 % de agua.	119
Tabla 17. Datos Método de Mohr.	121

Tabla 18. Resultados Comparativos de Método Electrométrico y Método de Mohr.

122

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Manual De Uso Herramienta Electrométrica Para Determinar El Contenido De Sal En Crudos.	128
Anexo B. Datos De Corriente.	130

## RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA ELECTROMÉTRICA PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE SAL EN CRUDOS.\*

AUTORES: LOZADA VALBUENA, Alexandra Vanessa y RODRIGUEZ HERNANDEZ Jorge Armando.\*\*

### PALABRAS CLAVE:

Salinidad, cloruros, conductividad, electrométrico, emulsión, sal en crudo, Método de Mohr, ASTM D3230, resistividad, experimento.

### DESCRIPCION.

En el presente documento se plantea el diseño e implementación de una herramienta basada en precipitación eléctrica como método físico para determinar el contenido de sal en hidrocarburos líquidos a partir de un procedimiento conocido como el método electrométrico propuesto en la norma ASTM D3230.

Todos los crudos cuando son producidos, contienen varias cantidades de sal en solución usualmente y en mayor proporción cloruro de sodio y en pequeñas cantidades cloruro de magnesio y cloruro de calcio. El tratamiento realizado en campo a estos crudos usualmente reduce la cantidad de tales sales; pero el crudo entregado a la refinería aun contiene cantidades apreciables de sal que son responsables de múltiples problemas en las operaciones de producción, almacenamiento y transporte, debido al deterioro acelerado de la infraestructura presente. Por tales razones es necesario medir la cantidad de sal presente en el crudo, para que por medio de procesos químicos o físicos este contenido de sal sea reducido al nivel más bajo posible antes del proceso de refinación y de acuerdo a unos valores estándares definidos pueda ser comercializado.

La herramienta diseñada para tal fin se desarrolló con base en el planteamiento de varios escenarios en los cuales se variaban las concentraciones de sal y cantidad de agua presentes en la muestra de crudo, midiendo la corriente que atravesaba la mezcla crudo-solvente.

Finalmente con el análisis de los resultados obtenidos en cada medición se llega al planteamiento de una ecuación que va a relacionar conductividad con cantidad de sal presente en el crudo.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímica, Escuela de ingeniería de Petróleos, Director Ing. Cesar Augusto Pineda Gomez.

## ABSTRACT

TITLE: ELECTROMÉTRIC DEVELOPMENT TOOL FOR DETERMINING THE CONTENT OF SALT IN CRUDE.\*

AUTHORS: LOZADA VALBUENA, Alexandra Vanessa y RODRIGUEZ HERNANDEZ Jorge Armando.\*\*

KEYWORDS:

Salinity, chlorides, crude oil, conductivity, electrometric, emulsion, salt in crude, Mohr Method, ASTM D3230, Resistivity, experiment.

### DESCRIPTION.

This paper considers the design and implementation of a tool based on electric precipitation as a physical method to determine the salt content in liquid hydrocarbons from a process known as the electrometric method electrometric method proposed in ASTM D3230.

All crude, when produced, contain various amounts of salt in solution and in greater proportion of chlorides of sodium and small amounts of magnesium chloride and calcium chloride responsible for many problems in production operations, storage and transport, particularly because the rapid deterioration of this infrastructure. For these reasons it is necessary to measure the amount of salt in the oil, so that through chemical or physical process the salt content is reduced to the lowest level possible before the refining process and according to standards defined values can be marketed.

The tool designed for this purpose was developed based on several scenarios in which varying concentrations of salt and quantity of water present in the crude sample measuring the current flowing through the oil-solvent mixture.

Finally with the analysis of the results obtained in each measurement is reached the approach of an equation that will relate conductivity with amount of salt in the crude oil.

---

\* work of degree

\*\* Faculty of physical –chemical Engineering's, Engineering of Petroleum. Principal Ing. Cesar Augusto Pineda Gómez.

## INTRODUCCIÓN

El crudo producido en un campo viene acompañado usualmente por agua de formación, iones de sales en solución en el agua y diversos tipos de sólidos, entre otros contaminantes, responsables de múltiples problemas en las operaciones de producción, almacenamiento y transporte, debido particularmente al deterioro acelerado de la infraestructura presente. En la medida en que su presencia es inevitable, la industria ha establecido estándares de monitoreo, tratamiento y procesamiento que limitan su presencia en las corrientes de crudo, particularmente para cumplir con los requerimientos de transporte y venta. En el caso específico de la salinidad, los oleoductos y refinerías admiten contenidos que oscilan entre 5 – 20 libras de sal por cada mil barriles de crudo, como máximos para evitar trasladar su efecto hasta dichas instalaciones. De hecho, en la industria petrolera en Colombia se acepta un tope máximo de salinidad de 15 lb/Mil Bls.

En los campos maduros el agua suele percibirse como un mal necesario. Si bien el agua a menudo impulsa la producción primaria e interviene en la producción secundaria, parte de esta generalmente está emulsionada en el crudo y viene acompañada por cantidades de sal apreciable que afectan las tuberías y las facilidades de superficie con graves repercusiones sobre su infraestructura, particularmente porque favorece la presencia de procesos corrosivos. Aunque existen diferentes métodos para retirar estos excesos de sal del crudo, para su selección, instalación y operación se debe determinar previamente aspectos como los volúmenes de fluidos y las concentraciones de sal a tratar. Los procedimientos y herramientas para tal fin deben ser tan eficientes como sencillos, en la medida en que se trata de una operación rutinaria de constante monitoreo.

Con objeto de reducir la concentración de estas sales por debajo de los límites enunciados, se realizan procedimientos como el lavado por extracción, la adición de químicos, entre otros, cuya eficiencia depende en primera instancia del conocimiento acertado de las cantidades presentes en la mezcla, para lo cual se emplean diferentes métodos o herramientas prácticas, destacándose particularmente aquellas basadas en procesos de separación de la emulsión y cuantificación de las sales a través de titulaciones, procedimiento que se aplica por ejemplo en las instalaciones del Laboratorio de fluidos de la Escuela de Ing. De Petróleos de la UIS. Cabe destacar que aunque se trata de una técnica ampliamente conocida, es bastante susceptible a la subjetividad del operador a la hora de observar y/o registrar los cambios en las tonalidades de la mezcla, por lo cual es imprescindible la realización de varias valoraciones para garantizar los resultados.

Mediante el desarrollo de este proyecto se plantea diseñar una herramienta adicional para determinar el contenido de sal en un crudo a partir de un procedimiento diferente, conocido como el método electrométrico propuesto en la norma ASTM D3230, con el cual se espera contrastar los resultados que se obtienen con la técnica tradicional (método Aruba), así como dotar al Laboratorio de Fluidos del programa con una nueva alternativa para la medición de esta importante propiedad que se encuentre estandarizada desde una normativa ASTM.

## 1. METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Los experimentos se realizan en todos los campos de la ciencia, usualmente para descubrir algo acerca de un sistema o un proceso en particular. Se puede definir experimento como una prueba o serie de pruebas en las cuales se realizan cambios en las variables de entrada de un proceso o sistema para que se pueda identificar las alteraciones en las respuestas de salida del sistema<sup>1</sup>.

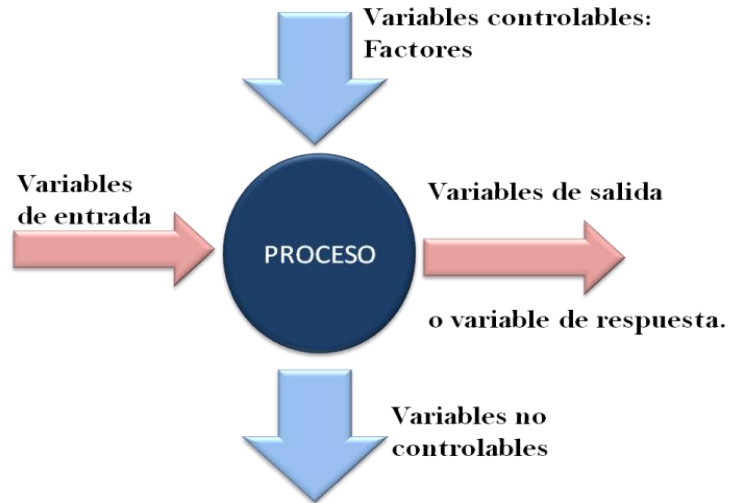
En la ingeniería la experimentación cumple un papel muy importante en el diseño de productos, desarrollo y mejoramiento de procesos. El objetivo en muchos casos puede ser desarrollar un proceso firme, es decir un proceso que sea afectado en una mínima parte por fuentes externas de variabilidad.

En algunos experimentos, los resultados y las conclusiones que se pueden obtener dependen en gran medida de la forma en la cual fueron recolectados los datos. En general, los experimentos son usados para el estudio del funcionamiento de procesos y sistemas, en la figura 1 se presenta el proceso o sistema estudiado.

---

<sup>1</sup> COX, D. R, N. Reid. The Theory of the Design of Experiments. Editorial CHAPMAN & HALL/CRC P.53

**Figura 1. Modelo general de un proceso o sistema**



Fuente: Montgomery, Douglas C. Design And Analysis Of Experiments. John Wiley & Sons.

Estos procesos se pueden visualizar como una combinación de maquinas, métodos, gente y otros recursos que transforman las variables de entrada en variables de salida que puedan tener una o más respuestas observables.

Dentro de los objetivos principales de un experimento se tienen:

1. Determinar cuáles son las variables más influyentes en la respuesta del proceso ( $y$ ).
2. Determinar la ubicación de las  $x$  que influyen en el proceso tal que  $y$  sea casi siempre cercana al valor nominal deseado.
3. Determinar la ubicación de las  $x$  que influyen en el proceso de tal manera que la variabilidad en  $y$  sea mínima.

4. Determinar la localización de las  $x$  que influyen en el proceso tal que el efecto de las variables no controlables  $Z_1, Z_2 \dots Z_q$  sea minimizado<sup>2</sup>.

La planificación de la experimentación debe considerar los siguientes aspectos importantes:

- La experimentación es normalmente costosa. Exige personal, tiempo, instrumentación, etc. se debe por tanto contemplar el menor número de experimentos que permitan obtener la información buscada.
- El resultado observado de un experimento ( $y$ ) tiene incertidumbre; si  $h$  es el resultado “verdadero” (desconocido) del experimento:  $y = h + e$  donde  $e$  es una contribución aleatoria, que varía cada vez que se repite el experimento. Por ello, en el diseño de los experimentos y en la evaluación de los resultados experimentales, la estadística juega un papel fundamental pues es la disciplina que proporciona las herramientas para trabajar en ambientes de incertidumbre.
- El análisis de los resultados experimentales permitirá obtener conclusiones sobre el objeto en estudio y decidir las acciones a seguir.

Es razonable utilizar metodologías matemáticas y estadísticas que permitan diseñar la secuencia de experimentos de una forma óptima, de modo que se minimice tanto el costo de la experimentación como la influencia del error experimental sobre la información buscada; éste es el objetivo del Diseño Estadístico de Experimentos.

---

<sup>2</sup> J.P HOLMAN Métodos Experimentales para Ingenieros, editorial McGRAW-HILL México 1997. P. 41

## 1.1 GENERALIDADES Y CONCEPTOS

Para lograr un buen desempeño a lo largo de capítulos posteriores, es necesario conocer algunos conceptos que se manejarán en este libro.<sup>3</sup>

**EXPERIMENTO:** Se refiere a la creación y preparación de lotes de prueba que verifiquen la validez de las hipótesis establecidas sobre las causas de un determinado problema, en nuestro caso de estudio problemas en las operaciones de producción, almacenamiento y transporte, debido particularmente al deterioro acelerado de la infraestructura presente por la presencia de iones de sales.

**DISEÑO DE EXPERIMENTOS:** Metodología estadística destinada a la planificación y análisis de la herramienta electrométrica a desarrollar.

**VARIABLE:** Característica de un objeto que puede ser observada y que puede tomar diferentes valores.

En el desarrollo de este proyecto la variable que va a ser observada y determinada es el contenido de sal que acompaña al crudo producido por el campo.

Se distinguen dos tipos fundamentales de variables:

Variables cualitativas: Son aquellas cuyos valores, de carácter nominal, sólo pueden ser comparados como diferentes entre sí.

---

<sup>3</sup> Las definiciones a continuación son tomadas de Robert O. Kuehl, año 2001 y Douglas C. Montgomery, Quinta edición.

Ejemplos: El color del crudo, puede tomar colores oscuros, o claros dependiendo del tipo de crudo si es pesado o liviano respectivamente.

Variables continuas: Son aquellas cuyos valores, de carácter numérico, permiten realizar un mayor número de comparaciones. Una variable continua permite teóricamente, un infinito número de valores entre dos valores consecutivos.

El equipo de medición está diseñado para trabajar con una variable de tipo continua que está asociada a la precisión de la misma la cual pone un límite operativo al obtener los valores calculados.

**SUJETO O UNIDAD EXPERIMENTAL:** El sujeto o unidad experimental es la unidad básica sobre la que se efectúa el proceso de medida.

**OBSERVACIÓN:** Una observación es una toma de medida de una variable y consta de un valor de la misma. Dependiendo del tipo de Diseño, las observaciones pueden tomarse a diferentes sujetos o al mismo sujeto de manera secuencial.

**REPETIBILIDAD:** Concordancia en los resultados obtenidos de una serie de pruebas realizadas a la misma muestra.

## **DIFERENTES TIPOS DE VARIABLES EN EL DISEÑO DE UN EXPERIMENTO**

En un Diseño de Experimento se distinguen los siguientes tipos de variables, según el contenido conceptual, o papel que tienen en el mismo.

Variable independiente. Es el factor (causa) que suponemos influye sobre la característica que medimos (defecto, error, etc.). Para comprobar su influencia, el investigador la manipulará durante el Experimento, en el sentido que le asignará valores diferentes a cada observación. En este caso de estudio se pueden considerar variables independientes: La concentración de sal, la naturaleza de la emulsión, voltaje, porcentaje de agua, °API y homogeneidad de la muestra.

Variable dependiente. Es aquella variable que se mide en cada observación del experimento, para establecer si la variable independiente efectivamente influye sobre sus valores. En el diseño de la herramienta esta variable hace referencia a la corriente eléctrica que circula a través de los electrodos.

Variables extrañas. Son todas aquellas que el investigador no puede manipular, pero influyen en la variable dependiente. Son la causa de que las observaciones en un mismo nivel de tratamiento no necesariamente arrojen el mismo valor de medida. Este tipo de variables hace referencia a los contaminantes que pueda contener la muestra de crudo a analizar.

El conjunto de variables extrañas se denomina generalmente "error experimental".

Variable de bloqueo. Es una variable que sabemos puede intervenir en los niveles de la variable dependiente y decidimos eliminar su influencia mediante el control de la misma, creando bloques de observaciones, en los que esta variable, asume respectivamente un valor constante. Se pueden considerar variables de bloqueo la naturaleza de la emulsión, homogeneidad de la muestra y temperatura.

**REPETICIÓN:** Es la reiteración de una observación o medida al mismo nivel de tratamiento. Se desarrolla realizando más de una medición de la corriente para establecer el contenido de sal presente en el crudo utilizando el equipo diseñado de tal manera que se pueda analizar su precisión, los efectos de las variables extrañas sobre la medición y el error experimental.

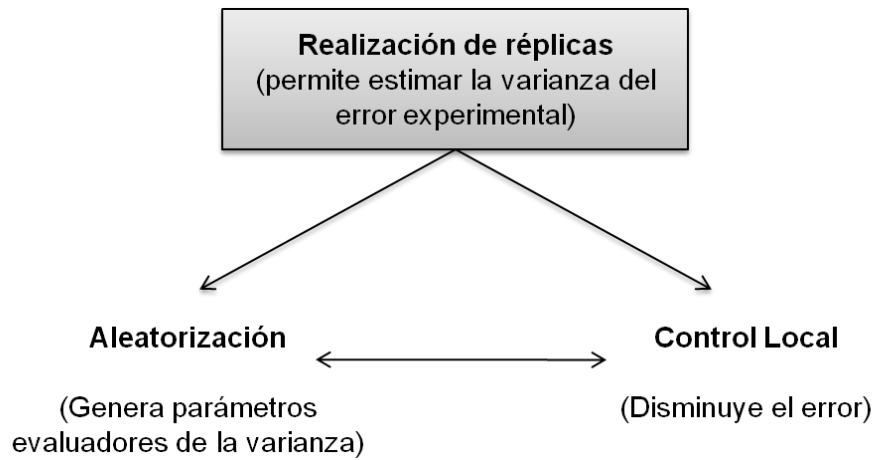
**HIPOTESIS:** Proposición o suposición planteada por el experimentador y es validada por cada una de las observaciones realizadas. La hipótesis en el desarrollo de este experimento se plantea de la siguiente forma: El contenido de sal presente en la muestra de crudo es directamente proporcional a la corriente eléctrica leída en la herramienta.

**TAMAÑO DE EXPERIMENTO:** Es el numero de observaciones realizadas en el experimento. En este experimento se realizarán varias observaciones con los diferentes factores de bloqueo a diferentes muestras de crudo.

## **1.2 PRINCIPIO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

El Diseño de Experimentos inicia en 1935 con los estudios realizados por Ronald A. Fisher, quién sentó la base de la teoría del Diseño Experimental y que a la fecha se encuentra bastante desarrollada y ampliada. En la década de los 30`s publicó su primer artículo, recopilando todas sus ideas desarrolladas sobre este tema, “ The Arrangement of Field Experiments” dando a conocer el concepto de análisis de varianza, el cual da origen a los tres principios básicos del diseño experimental: aleatorización, realización de replicas y formación de bloques, ver Figura 1.

**Figura 2. Principios de diseño de experimentos (Fisher, 1926)**



**1.2.1 Realización de réplica.** Este principio se basa en el número de veces que se realiza un tratamiento a unidades experimentales independientes, este proceso puede ser balanceado o desbalanceado si el número de repeticiones es igual para todos los tratamientos o no, respectivamente. Las principales propiedades de este son: la estimación del error experimental y del efecto medio de cualquier variable en el experimento.

Las principales razones realizar réplicas de los tratamientos en los experimentos son:

- Demuestra que se pueden reproducir los resultados, al menos bajo las condiciones experimentales actuales.
- Proporciona cierto grado de seguridad contra resultados anormales en el experimento, debidos a accidentes no previstos.

- Proporciona las medias para estimar la varianza del error experimental. Aun cuando la experimentación previa proporcione estimaciones de la varianza, la estimación a partir del experimento en curso puede ser más exacta porque refleja el comportamiento actual de las observaciones.
- Proporciona la posibilidad de aumentar la precisión en la estimación de las medidas de los tratamientos.

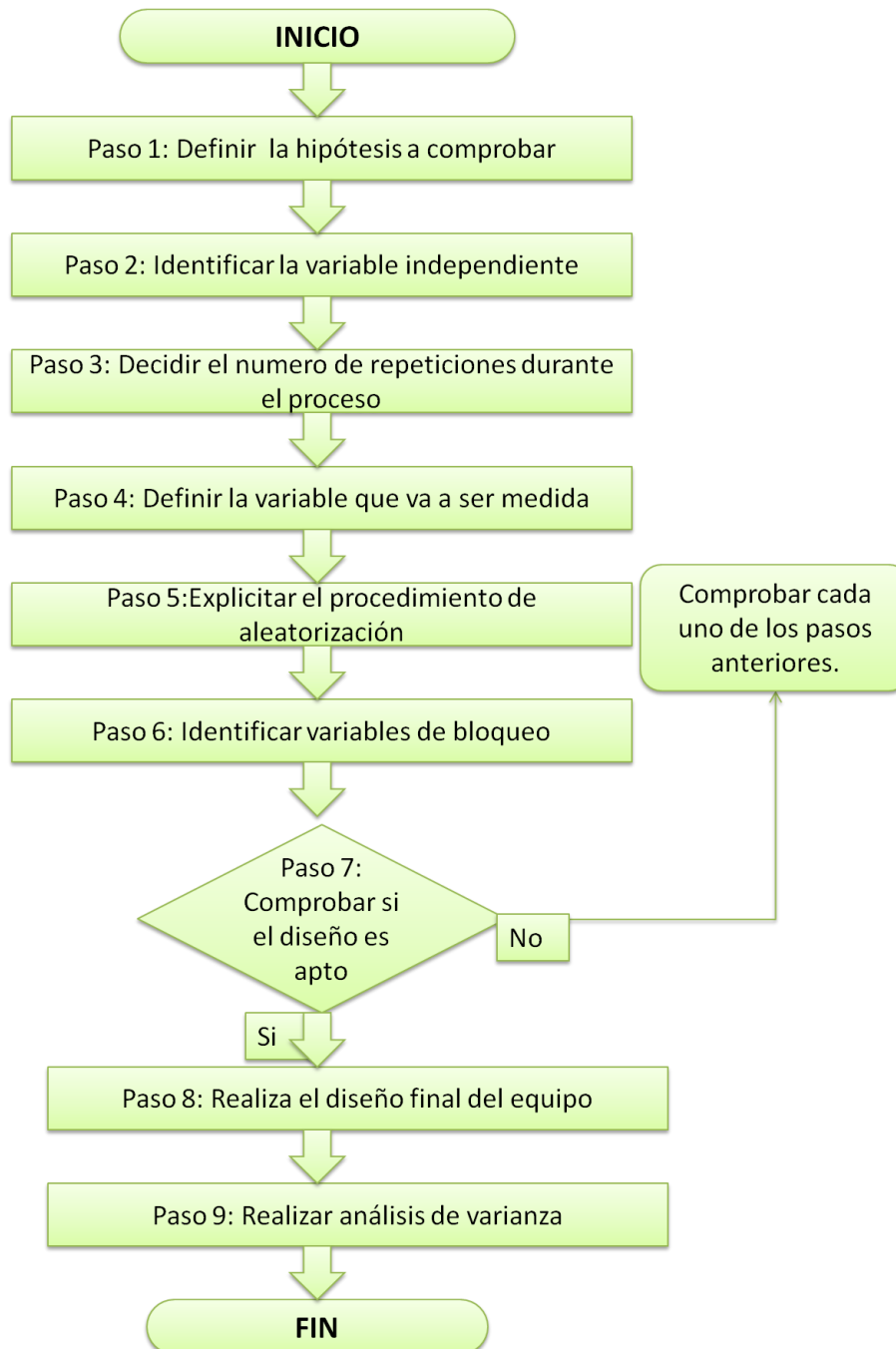
**1.2.2 Aleatorización** Esta técnica es utilizada para reducir la influencia no predeterminable de variables extrañas sobre los resultados del Experimento.

La aleatorización consiste en asignar los sujetos a los distintos niveles de tratamiento al azar, con la esperanza de que los efectos extraños se contrarresten entre los distintos sujetos y observaciones que componen cada nivel de tratamiento (condición experimental).

La aleatorización es fundamental en el Diseño de Experimentos ya que:

- Evita la dependencia entre observaciones.
- Confirma la adecuación de los procedimientos estadísticos para el análisis de los resultados del Experimento.

Figura 3. Diagrama de Flujo. Diseño de Experimentos.



Fuente: Los Autores

**1.2.3 Control Local.**<sup>4</sup> Este principio consiste en realizar subconjuntos de las unidades experimentales usando técnicas de bloqueo, balanceo y agrupamiento, siendo estas, estrategias usadas por el experimentador para reducir y controlar el error experimental ya que permiten eliminar los efectos de las variables extrañas que generan variaciones en las observaciones entre las unidades experimentales.

- **Bloqueo:** Técnica que permite reducir la variabilidad natural; consiste en la agrupación de las unidades experimentales de la manera más homogénea que sea posible, estos subgrupos se hacen en relación a una o más variables de las que se conoce o se espera un efecto significativo en el comportamiento de la variable respuesta, todo con el fin de separar el error experimental de la variabilidad asociada con las diferencias entre los grupos de unidades.
- *Los cuatro criterios que se usan con más frecuencia para crear bloques de las unidades experimentales son: 1) Proximidad 2) Características físicas 3) Tiempo 4) Administración de tareas en el experimento.*<sup>5</sup>
- **Balanceo:** Consiste en realizar un agrupación de unidades experimentales y una asignación de tratamientos lo más equilibradamente posible entre cada uno de los bloques formados, de esta forma resulta una configuración balanceada.
- **Agrupamiento:** Consiste en agrupar bloques de unidades experimentales homogéneas, de forma que estos grupos puedan ser sometidos a diferentes tratamientos.

---

<sup>4</sup> Ibid

<sup>5</sup> Fuente: Kuehl, Robert O. Diseño de experimentos. Segunda edición. Thompson Learning, 2001.

## 1.3 MODELOS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

**1.3.1 Diseños unifactoriales.** Este modelo da las pautas para analizar aquellos experimentos en los cuales solo hay un factor de interés y de éste se tiene más de dos niveles para estudio. Este tipo de experimento se aleatoriza completamente y se compara las medias de las respuestas en cada uno de los tratamientos con el fin de identificar una diferencia entre ellas.

Dependiendo del número de observaciones realizada por cada tratamiento, ya sean iguales o diferentes, el diseño puede ser balanceado o desbalanceado respectivamente. Para analizar los resultados obtenidos de este diseño se debe realizar un “*análisis de varianza*” ya que es el procedimiento adecuado para probar la igualdad de varias medidas.

**1.3.2 Diseños por bloques.** Dentro de las variables que se pueden presentar durante la realización de un experimento son las variables perturbadoras, existen algunos casos donde estas variables son conocidas y a la vez se pueden controlar, sin embargo para un experimentador no es de interés el efecto de esta variable, el modelo de bloques presenta una alternativa que elimina el efecto de dicha variable en el momento del análisis. De esta manera, se puede decir que se puede formar unidades experimentales mediante la formación de bloques. Este modelo es aplicado cuando se estudia una sola fuente de información perturbadora.

**1.3.3 Diseños Factoriales.** Este modelo es el más usado puesto que permite identificar y analizar el comportamiento de la variable de salida frente a la acción

de variables independientes en diferentes niveles, permitiendo realizar conclusiones dentro de un rango de condiciones de operación. Este modelo es más eficiente frente a la estrategia de experimentación de un factor a la vez, ya que permite el análisis de interacciones entre variables de entrada.

**1.3.4 Otros diseños.** Los diseños explicados anteriormente son los comúnmente utilizados en situaciones cuando el número de variables es reducido, sin embargo se pueden presentar situaciones en las cuales el número de factores de estudio con un mínimo de corridas hace del experimento un proceso bastante extenso y sin embargo no todas las corridas aportan información significativa para el estudio del comportamiento del sistema.

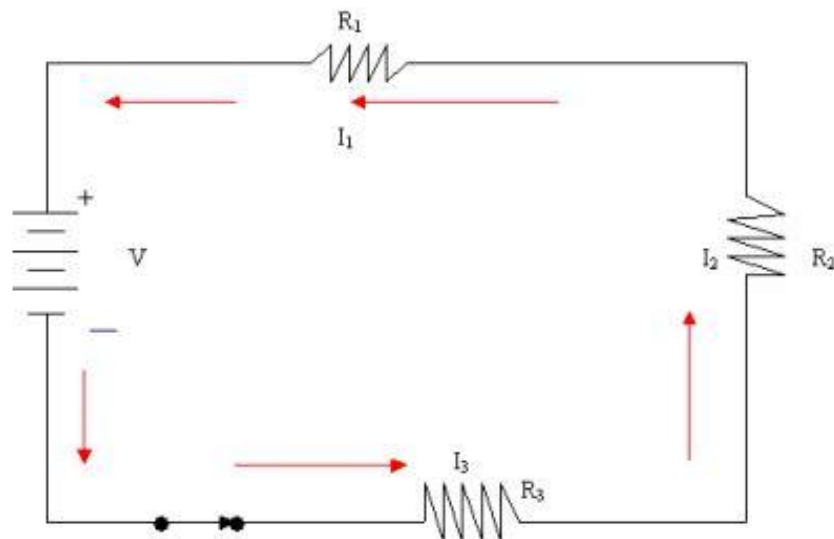
Para dar una solución a lo anteriormente mencionado, se aplican los diseños factoriales fraccionados, que consisten en correr una fracción del experimento factorial completo y resulta ser muy efectivo pues consta de tres propiedades principales que son: El principio de efectos esparcidos o escasez de efectos, la propiedad de proyección y la experimentación secuencial.

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO PARA LA MEDICIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA

### 2.1 CORRIENTE ELECTRICA

La corriente eléctrica es el término con el que se conoce un fenómeno físico que se origina debido a la circulación de cargas o electrones a través de un circuito eléctrico cerrado, siendo siempre el movimiento del polo negativo al polo positivo de la fuente de suministro de fuerza electromotriz (FEM).

Figura 4. Circuito Eléctrico.

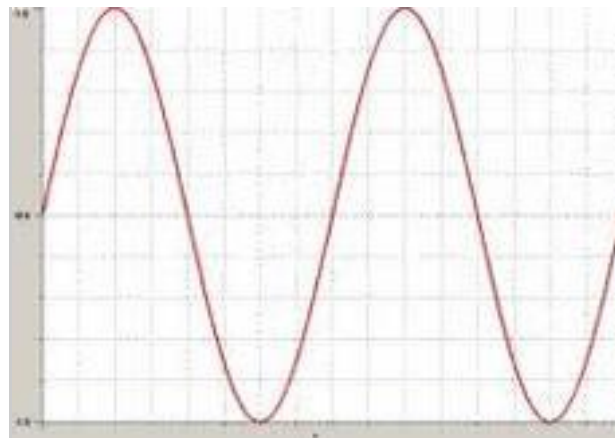


Fuente: Los Autores

**2.1.1 Corriente alterna.** La corriente eléctrica alterna (habitualmente llamada corriente alterna CA o en inglés AC) es un tipo de corriente variable periódica ampliamente utilizada en la industria.

Este tipo de corriente se caracteriza porque el sentido de la circulación de las cargas cambia una vez cada cierto tiempo, es decir la corriente eléctrica cambia de sentido, alternándose de positivo a negativo y al contrario, como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 5. Corriente Alterna**



Fuente: Los Autores

Son los alternadores, máquinas que se encuentran en las centrales eléctricas, las encargadas de generar corriente alterna a partir de movimientos rotatorios aplicados a ellos.

La frecuencia de la corriente alterna (alternancia entre signos) dependerá del número de revoluciones por segundo que le sea aplicado a dicho alternador, luego

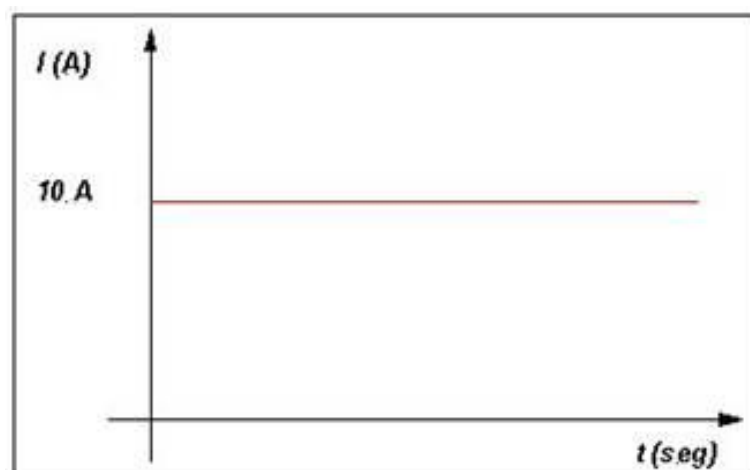
para mantener constante la frecuencia de la corriente alterna, deberá permanecer constante el número de vueltas o revoluciones del movimiento aplicado.

**2.1.2 Corriente Directa.** La corriente directa o corriente eléctrica continua es aquella que permanece constante e invariable a lo largo del tiempo al contrario del caso de la corriente alterna.

Su representación grafica seria una recta horizontal, lo que indica que la diferencia de potencial o tensión eléctrica se mantiene constante y con igual valor a lo largo de todo el tiempo.

Como se puede intuir, la frecuencia de la corriente continua es 0, puesto que no produce alternancia o variación alguna.

**Figura 6. Corriente Directa.**



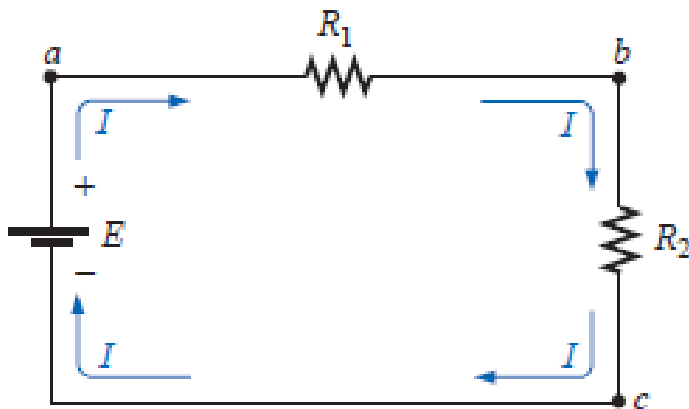
Fuente: Los Autores

## 2.2 CIRCUITOS

Se denomina circuito eléctrico a una serie de elementos o componentes eléctricos o electrónicos, tales como resistencias, inductancias, condensadores, fuentes, y/o dispositivos electrónicos semiconductores, conectados eléctricamente entre sí con el propósito de generar, transportar o modificar señales electrónicas o eléctricas.

**2.2.1 Circuitos en Serie.** Un circuito en serie es una configuración de conexión en la que los bornes o terminales de los dispositivos (generadores, resistencias, condensadores, interruptores, entre otros.) se conectan secuencialmente. La terminal de salida de un dispositivo se conecta a la terminal de entrada del dispositivo siguiente.

Figura 7. Circuito En Serie.



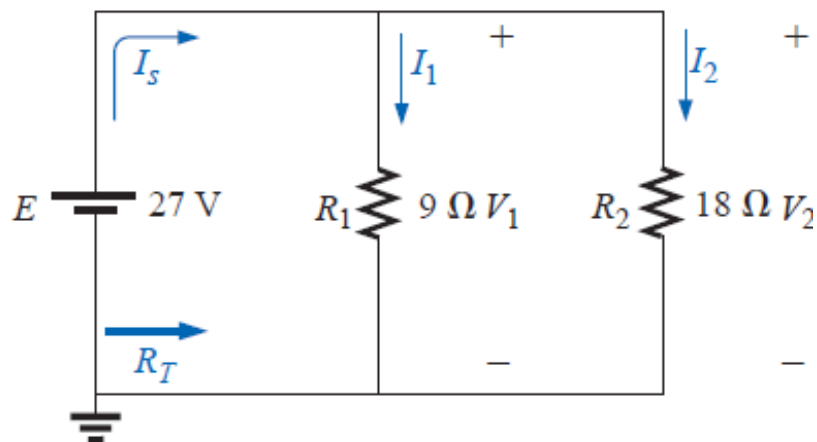
Fuente: Los Autores

En el experimento a desarrollar se utilizara una configuración en la cual la muestra de crudo a analizar completará un circuito en serie, mediante el cual se podrá

determinar la corriente que fluye a través de esta asociado al contenido de sal presente en la misma.

**2.2.2 Circuitos en Paralelo.** El circuito en paralelo es una conexión donde los bornes o terminales de entrada de todos los dispositivos (generadores, resistencias, condensadores, etc.) conectados coincidan entre sí, lo mismo que sus terminales de salida.

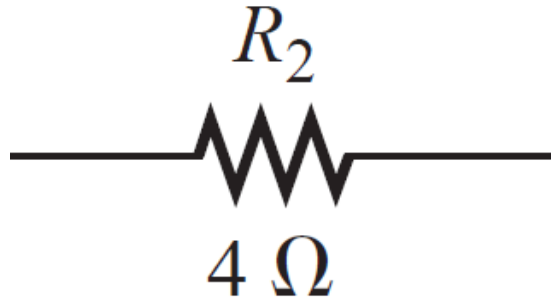
Figura 8. Circuito en paralelo.



Fuente: Los Autores

**2.2.3 Resistividad.** En flujo de carga a través de cualquier material encuentra una fuerza opuesta similar en muchos aspectos a la fricción mecánica. Esta oposición, debido a las colisiones entre electrones y electrones y otros átomos en el material, el cual convierte la energía eléctrica en otra forma de energía como el calor, es llamada resistencia del material. Las unidades de medida de la resistencia es el ohm, para el cual el símbolo es  $\Omega$ , la letra griega omega. El símbolo de circuito para la resistencia aparece en la figura:

Figura 9. Símbolo de Resistencia.



La resistencia de algunos materiales con área uniforme es determinada por los siguientes 4 factores:

1. Material
2. Longitud
3. Área
4. Temperatura

Como es de esperar, a mayor longitud que la carga debe recorrer mayor el nivel de resistencia, donde mayor el área, menor la resistencia. Entonces la resistencia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área.

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \Omega \quad (1)$$

Donde

R = resistencia [ $\Omega$ ]

$\rho$  = Resistividad [ $\Omega \cdot \text{m}/\text{mm}^2$ ]

L = longitud del material [m]

S = área de sección transversal [ $\text{mm}^2$ ]

Se le llama resistividad al grado de dificultad que encuentran los electrones en sus desplazamientos. Se designa por la letra griega rho minúscula ( $\rho$ ) y se mide en ohm por milímetro cuadrado sobre metro ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ).

Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor.

Para llevar a cabo este experimento trataremos de identificar la resistividad de las diferentes muestras de crudo de acuerdo al contenido de sal presente en ellas.

**2.2.4 Conductividad.** La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. También es definida como la propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones (y huecos en el caso de los semiconductores) pueden pasar por él. Varía con la temperatura. Es una de las características más importantes de los materiales.

La conductividad es la inversa de la resistividad, y su unidad es el S/m (siemens por metro).

$$\sigma = \frac{1}{R} \quad \frac{S}{m} \quad (2)$$

**2.2.5 Ley de OHM.** Está asociada a la siguiente relación ecuación (3):

$$Efecto = \frac{causa}{oposición} \quad (3)$$

Cada conversión de energía de una forma a otra puede ser relacionado a esta ecuación. En circuitos eléctricos, el efecto que se trata de establecer es el flujo de carga, o la corriente. La diferencia de potencial, o voltaje entre dos puntos es la causa (presión), y la oposición es la resistencia encontrada.

Una simple analogía con un circuito eléctrico sencillo es el agua en una manguera conectada a una válvula de presión, donde se asocian los electrones en el alambre de cobre como el agua en la manguera, la válvula de presión como el voltaje aplicado, y la longitud de la manguera como el factor que determina la resistencia. Si la presión de la válvula es cerrada, el agua simplemente queda en la manguera sin movimiento, tal como los electrones en un conductor sin un voltaje aplicado. Cuando se abre la válvula de presión, el agua fluirá a través de la manguera tal como los electrones en un alambre de cobre cuando un voltaje es aplicado. En otras palabras la ausencia de la “presión” en un caso y el voltaje en otro resultará en un sistema sin movimiento o reacción. La tasa a la cual el agua fluye es función del tamaño de la manguera. Así una manguera con un diámetro

muy pequeño limitará la tasa de flujo del agua de la misma forma que un alambre de cobre con un diámetro pequeño tendrá una alta resistencia y limitará la corriente.

$$\text{Corriente} = \frac{\text{Diferencia de potencial}}{\text{Resistencia}} \quad (4)$$

$$I = \frac{E}{R} \text{ Amperios, } A \quad (5)$$

Esta ecuación es conocida como la Ley de Ohm en honor a Georg Simon Ohm. La ley claramente revela que para una resistencia fija, a mayor voltaje (o presión) a través de la resistencia, mayor es la corriente, y que a mayor resistencia para el mismo voltaje, menor es la corriente. En otras palabras, la corriente es proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia.

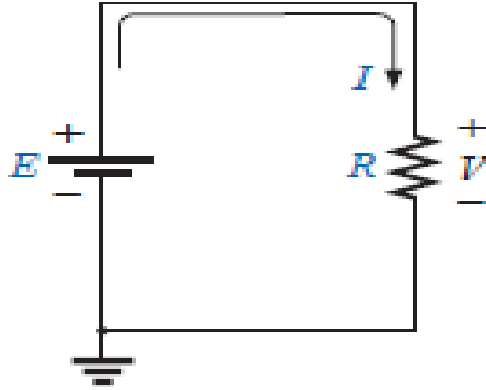
Por simple manipulación matemática, el voltaje y la resistencia pueden ser encontrados en términos de las otras 2 cantidades:

$$E = IR \text{ volts, } V \quad (6)$$

$$R = \frac{E}{I} \text{ ohms, } \Omega \quad (7)$$

Las tres cantidades de las ecuaciones son definidas por el circuito simple de la siguiente figura:

Figura 10. Representación de Voltaje y resistencia.



Fuente: Los Autores

### 2.3 CONDUCTIVIDAD DE SUSTANCIAS

La conductividad eléctrica es una de las características más importantes de los electrolitos ya que representa la capacidad de estos para transportar la corriente eléctrica.

La resistencia de un conductor electrolítico al paso de la corriente de puede determinar mediante la ley de ohm, si se le aplica una diferencia de potencial a un fluido que contenga iones, se establecerá una corriente de iones positivos que se mueven en la dirección del campo eléctrico y los iones negativos lo harán en sentido contrario.

La conductividad electrolítica es una medida de la disociación de una solución que permite el paso de la corriente eléctrica por la migración de iones bajo la influencia de un gradiente de potencial.

Los iones se mueven a una velocidad que depende de su carga y tamaño, la viscosidad del medio y la magnitud del gradiente de potencial.

Las determinaciones de la conductividad reciben el nombre de determinaciones conductométricas y tienen muchas aplicaciones como, por ejemplo:

- En la electrólisis, ya que el consumo de energía eléctrica en este proceso depende en gran medida de ella.
- En los estudios de laboratorio para determinar el contenido de sal de varias soluciones durante la evaporación del agua (por ejemplo en el agua de calderas o en la producción de leche condensada).
- En el estudio de las basicidades de los ácidos, puesto que pueden ser determinadas por mediciones de la conductividad.
- Para determinar las solubilidades de electrólitos escasamente solubles y para hallar concentraciones de electrólitos en soluciones por titulación.
- La conductividad eléctrica se utiliza para determinar la salinidad (contenido de sales) presente en hidrocarburos líquidos que es el tema de estudio en el desarrollo de experimento.

## 2.4 HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN

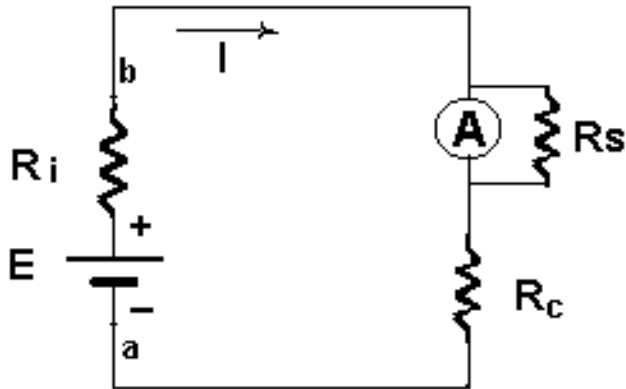
- **Amperímetros** Un amperímetro es un instrumento que sirve para medir la intensidad de corriente que está circulando por un circuito eléctrico.

AL hablar en términos básicos, el amperímetro es un simple galvanómetro (instrumento para detectar pequeñas cantidades de corriente) con una resistencia en paralelo, llamada Shunt. Los amperímetros tienen una resistencia interna muy pequeña, por debajo de 1 ohmio, con la finalidad de que su presencia no disminuya la corriente a medir cuando se conecta a un circuito eléctrico.

Para efectuar la medida es necesario que la intensidad de la corriente circule por el amperímetro, por lo que éste debe colocarse en serie, para que sea atravesado por dicha corriente. El amperímetro debe poseer una resistencia interna lo más pequeña posible con la finalidad de evitar una caída de tensión apreciable.

Aunque la mayor parte de la corriente pasa por la resistencia de la derivación, la pequeña cantidad que fluye por el medidor sigue siendo proporcional a la intensidad total por lo que el galvanómetro se puede emplear para medir intensidades de varios cientos de amperios.

Figura 11. Conexión Amperímetro.



Fuente: Los Autores

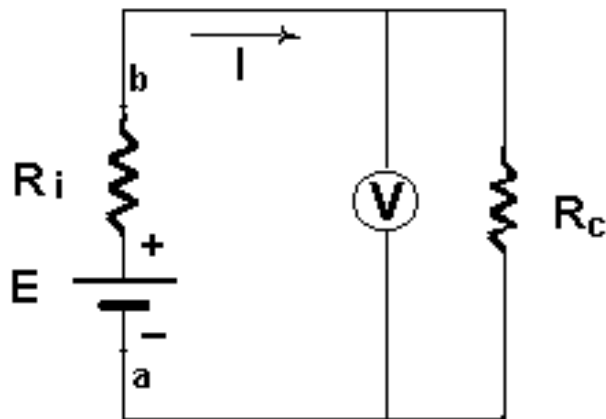
En la Figura 11 se muestra la conexión de un amperímetro (A) en un circuito, por el que circula una corriente de intensidad ( $I$ ), así como la conexión del resistor Shunt ( $R_S$ ).

- **Voltímetro** Un voltímetro es un instrumento que sirve para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico.

Para efectuar la medida de la diferencia de potencial el voltímetro ha de colocarse en paralelo; esto es, en derivación sobre los puntos entre los que se trata de efectuar la medida. Esto conlleva a que el voltímetro debe poseer una resistencia interna lo más alta posible, a fin de que no produzca un consumo apreciable, lo que daría lugar a una medida errónea de la tensión. Para ello, en el caso de instrumentos basados en los efectos electromagnéticos de la corriente eléctrica, estarán dotados de bobinas de hilo muy fino y con muchas espiras, con lo que con

poca intensidad de corriente a través del aparato se consigue el momento necesario para el desplazamiento de la aguja indicadora.

**Figura 12. Conexión de voltímetro.**



Fuente: Los Autores

En la Figura 12 se puede observar la conexión de un voltímetro (V) entre los puntos de *a* y *b* de un circuito, entre los que se desea medir su diferencia de potencial.

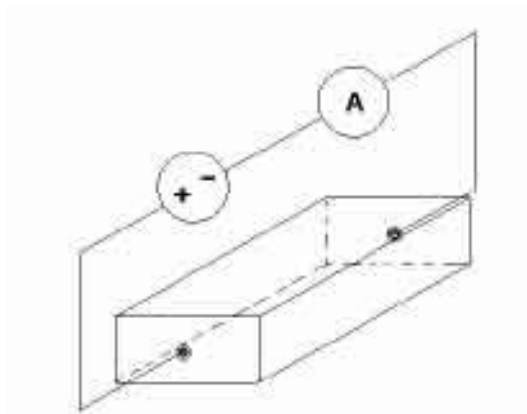
## **2.5 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD**

Para obtener una medida de la conductividad eléctrica de cualquier material es necesario aplicar una señal eléctrica, censar la respuesta ante dicha señal y tener en cuenta la geometría de la muestra del cuerpo o sustancia en estudio.

Para ello existen diversos métodos de medición de dicha propiedad física, tales como el método de los dos puntos, cuatro puntos y tres puntos, métodos que fueron desarrollados para el estudio de distintos materiales.

- **El método de los dos puntos:** Consiste en la utilización de dos electrodos ubicados en los extremos de la muestra para la aplicación de una señal de tensión o corriente. Con el uso de un amperímetro o voltímetro se mide la corriente o tensión respectivamente en la muestra y así se calcula su resistencia, además de ello debe contar con un área transversal uniforme y longitud conocida para facilidad en la determinación del factor geométrico<sup>6</sup>.

**Figura 13. Método de los dos puntos.**



Fuente: Los Autores

Este método ha sido seleccionado para ser utilizado en el desarrollo de este experimento debido a la preferencia que se tiene por el mismo en situaciones

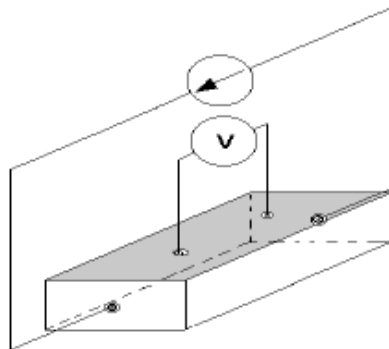
---

<sup>6</sup> Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase 1999 Cap. 43. P 5.

donde se requiere de mayor precisión. El método de los dos puntos ha sido estudiado con muy buenos resultados y se puede usar para la determinación de la conductividad de soluciones estándar, en este caso de estudio una solución salina presente en una emulsión de crudo.

- **Método de los cuatro puntos:** Este método requiere del uso de cuatro electrodos, dos de ellos para aplicar una señal, y los otros dos para censar la respuesta. Este método resulta mucho más preciso que el de dos puntos. Además de la importancia de la forma de la muestra, resulta de igual importancia, la posición de los electrodos, ya que dos de ellos van en los extremos y los restantes en sitios intermedios.

**Figura 14. Método de los cuatro puntos.**



Fuente: Los Autores

**Método de Van Der Pauw:** Este método es una variación del método de los cuatro puntos con la ventaja de que permite la medición de muestras de forma arbitraria con espesor uniforme<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase 1999 Cap. 43. P 9.

### 3. CARACTERIZACION DE LAS EMULSIONES

Gran parte del crudo producido en el mundo esta acompañado por agua emulsionada que requiere tratamientos posteriores. Para evitar el incremento en los costos de transporte, tratamiento, disposición de agua y deterioro del equipo, los compradores de crudo limitan el agua y sedimento (BS&W) en el petróleo que compran. Estos límites dependen de las condiciones locales, prácticas y acuerdos contractuales que generalmente oscilan entre  $0.15\% < BS\&W < 0.4\%$ .

#### 3.1 DEFINICIÓN DE EMULSIÓN Y FORMACIÓN DE EMULSIONES

La emulsión<sup>8</sup> es una mezcla de dos líquidos inmiscibles (es decir, líquidos que no se mezclan bajo condiciones normales). Uno de los líquidos se dispersa completamente en el otro en la forma de diminutas gotas.

Se necesitan tres condiciones para la formación de una emulsión estable:

- **Dos líquidos inmiscibles:** En la industria del petróleo estos dos fluidos corresponden al agua y petróleo.
- **La agitación y turbulencia:** Las emulsiones no se forman espontáneamente, pues algún trabajo debe ser puesto en el sistema. La agitación debe ser suficiente para dispersar un líquido en diminutas gotitas dentro del otro. En un pozo fluyente, la turbulencia se puede proveer por el flujo del petróleo crudo a

---

<sup>8</sup> El sistema disperso formado por el líquido y las partículas sólidas se conoce como suspensión. Si las partículas están en el gas el sistema se llama aerosol.

través de la sarta de producción. Para un pozo de bombeo, además del flujo se tiene la turbulencia del bombeo.

- **Agente emulsificante:** Este es algún componente orgánico presente en el petróleo crudo que estabiliza la fase dispersada formando una dura y elástica película sobre la superficie de los glóbulos. Esta película es delgada y fácilmente visible bajo el microscopio. Su presencia dificulta la coalescencia de los glóbulos; ayudando a que los glóbulos salten o reboten alejándose unos de otros con un alto grado de elasticidad o frecuentemente rompiéndose en partículas más pequeñas. En cualquier sistema de tratamiento el objetivo es destruir la película protectora por neutralización del efecto del agente emulsificante. La característica estructural más importante de un agente emulsificante es que su molécula posee dos porciones bien definidas; una muestra afinidad exclusiva por el agua (Porción hidrosoluble) y otra por el aceite (Parte oleosoluble).

Los agentes emulsificantes naturales comúnmente presentes en la producción de petróleo y provenientes de la formación productora, son los siguientes: Parafinas, resinas, ácidos orgánicos, sales metálicas, arcillas coloidales, asfaltenos (materiales de N, S y O<sub>2</sub>); fluidos de perforación y de “work-over”.

Las emulsiones formadas por el agua y algún líquido orgánico son las más comunes en la naturaleza y utilizadas en la industria.

Las emulsiones en donde el agua es la fase continua se denomina emulsión inversa o emulsión de tipo “aceite en agua”, cuando el agua es la fase dispersa, la emulsión se llama directa o emulsión de tipo “agua en aceite”.

En la formación de las emulsiones ocurren dos procesos simultáneos: fraccionamiento y coalescencia de las gotas de la fase dispersa. La estructura de la emulsión (gotas mas o menos grandes) depende de la correlación entre las velocidades de estos dos procesos. Cuando las velocidades de fraccionamiento y coalescencia son iguales, la emulsión se encuentra en equilibrio.

Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables. Así en el estado de reposo, las gotas aumentaran su tamaño, ocurriendo una estratificación de la emulsión. Entre más rápido se de este proceso menos estable es la emulsión.

### **3.1.1 Factores estabilizantes que contribuyen a mantener una emulsión**

El agente emulsificante: La adsorción de los emulsificantes en la interfase hace disminuir la tensión superficial entre las fases y por consiguiente se hace menor la energía libre total del sistema y aumenta su estabilidad. Cuando mayor es la cantidad de emulsificante, mayor será la estabilidad de la emulsión. También se ha encontrado que no todos los emulsionantes tienen el mismo poder de estabilización de una emulsión. Los agentes emulsificantes son considerados como la impureza presente en el crudo que pueden ser de dos tipos:

OLEOFÍLICAS (solubles en el petróleo):

- Hidrocarburos (S, O, N, V)
- Asfaltenos, gomas, resinas
- Compuestos Nafténicos.

### HIDROFÍLICAS (Insolubles en el Petróleo)

- Salmuera (Cloruros de Na, Ca y Mg)
- Otras sales inorgánicas (SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>)
- Sedimentos (arcilla, arena, lodo de perforación)
- Sólidos filtrables (sulfuros metálicos y óxidos)
- Metales pesados (V, Ni, As)

Diferencia de densidad entre las fases: Cuanto menor es la diferencia entre las densidades de las gotas de agua o salmuera (Fase dispersa) y del petróleo (Fase continua) su separación será más lenta; por lo que el tiempo de decantación del agua será mayor.

Viscosidad de la fase continúa: La emulsión es más estable, cuando la viscosidad de la fase continua (Petróleo) es mayor. Las gotas de agua encuentran mayor resistencia a su desplazamiento, lo cual disminuye su coalescencia y por consiguiente el proceso de decantación resulta mucho más lento.

Presencia de cargas eléctricas en la fase dispersa: Cuanto mayor sea la carga eléctrica que pudieran tener las partículas dispersas (gotas de agua), más estable es la emulsión debido probablemente a que aumentan las fuerzas de atracción entre el agua y el emulsificante.

Las gotas de agua están cargadas eléctricamente a causa de la ionización de las sales disueltas, lo cual determina que la emulsión es más estable y difícil de romper.

Temperatura: La temperatura va asociada a otras características que influyen en la estabilidad de la emulsión. Bajas temperaturas favorecen la estabilidad de la emulsión debido a que esta condición aumenta la viscosidad y disminuye la diferencia de densidades entre las fases.

Edad de la emulsión: Si una emulsión es almacenada en un tanque y no es tratada, una cierta cantidad de agua coalescerá y se asentará por gravedad. Habrá un pequeño porcentaje de agua remanente en el crudo que tiende a formar una emulsión más estable. A menos que se aplique tratamiento para una ruptura completa.

Tamaño de las gotas y porcentaje de agua: Al incrementar la agitación o turbulencia, el tamaño de las gotas de agua decrecen y la emulsión se hace más estable. Una emulsión que contenga un alto porcentaje de agua, tendrá un mayor número de gotas de agua por unidad de volumen, por consiguiente habrá un mayor número de colisiones entre las gotas para así formar gotas más grandes y se pueda romper la emulsión.

**3.1.2 Medida de la estabilidad** Desde un punto de vista práctico, la medida de la estabilidad de la emulsión es una de las pruebas más importantes que puede ser desarrollada en una emulsión. Existen varios métodos disponibles para determinar la estabilidad, sin embargo, hasta ahora la prueba de la botella es la más simple y común. La prueba de la botella incluye dilución de la emulsión con un solvente, mezclando el desemulsificante, agitándose para dispersar el desemulsificante y observándose la separación de la fase en función del tiempo. La prueba es normalmente hecha a elevadas temperaturas y puede incluir centrifugación para una mejor separación. Mientras existen varios métodos y diferentes procedimientos seguidos por laboratorios, existen métodos estándar regidos por la

norma ASTM<sup>9</sup> disponibles para la determinación de sedimentos en el fondo y agua en una emulsión.

La estabilidad de una emulsión es generalmente relacionada a la facilidad de la separación del agua con el tiempo y dosificación de desemulsificante. La prueba de la botella es generalmente usada para determinar las cualidades y desempeño del desemulsificante.

### **3.2 TIPOS DE EMULSIONES**

Los dos tipos de emulsiones agua-aceite son conocidas como aceite en agua (o/w) y agua en aceite (w/o). Las emulsiones o/w se refieren a aceite disperso en el agua y las emulsiones w/o se refieren a agua dispersa en el aceite. El tipo de emulsión formada depende fundamentalmente del tipo de agentes emulsificantes. Una regla empírica predice que surfactantes predominantemente solubles en aceite forman emulsiones w/o y surfactantes solubles en agua producen emulsiones o/w. En los campos petroleros las emulsiones agua en aceite (w/o) son llamadas emulsiones regulares, mientras que las emulsiones aceite en el agua (o/w) son llamadas emulsiones inversas. Esta clasificación simple no siempre es adecuada, ya que emulsiones múltiples o complejas (o/w/o ó w/o/w) pueden también ocurrir.

Emulsiones del tipo o/w/o se refieren a emulsiones consistentes en gotas de aceite dentro de gotas de agua que están dispersas en la fase continua de aceite. Las emulsiones w/o/w tienen gotas de agua dispersas en gotas de aceite que a su vez están dispersas en la fase continua de agua.

---

<sup>9</sup> American Society for Testing and Materials. Normas para pruebas Standard.

En la industria del petróleo se identifican dos tipos diferentes de emulsiones:

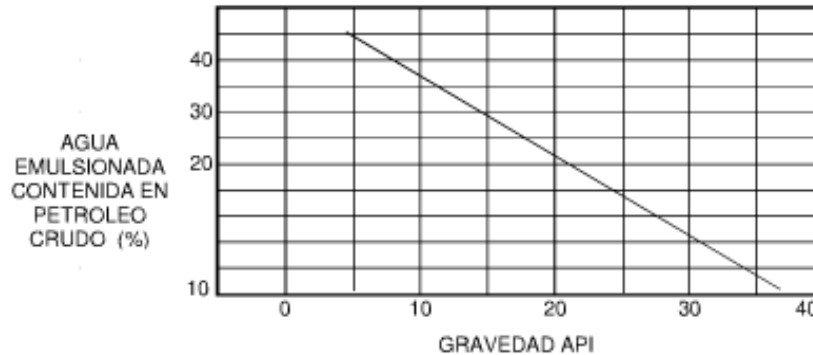
1. Agua en petróleo.
2. Petróleo en agua.

**3.2.1 Emulsión agua en petróleo.** En las emulsiones regulares, la fase acuosa dispersa es usualmente llamada agua y sedimento (A&S) y la fase continua es aceite crudo. El A&S 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 A&S también es llamado agua y sedimento básico (A&SB)

Comprende cerca del 99% de las emulsiones de los campos de petróleo. El contenido de agua puede variar de 0% a 80%, pero usualmente se encuentra en un rango de 10% a 35%.

Las emulsiones regulares producidas pueden ser clasificadas como duras y suaves. Por definición una emulsión dura es muy estable y difícil de romper, principalmente porque las gotas dispersas son muy pequeñas. Por otro lado, una emulsión suave o dispersión es inestable y fácil de romper. En otras palabras, cuando un gran número de gotas de agua de gran diámetro están presentes, ellas a menudo, se separan fácilmente por la fuerza gravitacional. El agua que se separa en menos de cinco minutos es llamada agua libre.

**Figura 15. Estimación de agua emulsionada contenida en crudo**



Fuente: (NATCO 1981)

**3.2.2 Emulsión petróleo en agua.** Este tipo de emulsión también es denominada emulsión inversa, está compuesta de glóbulos de petróleo dispersados en una fase de continua de agua. Este tipo ocurre aproximadamente en el 1% de las emulsiones producidas, estando el petróleo muy diluido, conteniendo menos del 1% de petróleo.

El método más simple para la identificación de una emulsión es por medio de un análisis microscópico. Una muestra de la emulsión se sitúa bajo el microscopio, y luego una pequeña cantidad, ya sea de petróleo o agua, es agregada. Aquel líquido que parece ser miscible con la emulsión representa la fase continua. Bajo un microscopio, los glóbulos individuales, son claramente visibles, por tanto por la prueba anterior y la apariencia de los glóbulos, los tipos más complicados también pueden ser identificados.

### 3.3. TRATAMIENTO DE CRUDO EMULSIONADO

Una emulsión puede desestabilizarse y romperse separándose las fases debido a un efecto externo. La mayor o menor resistencia de una emulsión a permanecer estable depende de varios factores, entre ellos: agentes emulsificantes, viscosidad de la fase continua, diferencia de densidad de líquidos, edad de la emulsión.

La ruptura de una emulsión depende de dos procesos: **Sedimentación y Coalescencia.**

Las materias extrañas que contienen el petróleo pueden incluir agua, arena, sedimentos, y otras impurezas. El término tratamiento alude a cualquier procedimiento diseñado para separar las materias extrañas del petróleo crudo.

Los siguientes son los métodos requeridos para romper emulsiones y separar sus dos componentes:

1. *Colisión de las gotas de agua:*

Para que las gotas de agua coalescan es necesario que se haya producido colisiones entre ellas, favoreciendo la ruptura de la película emulsionante. En el caso de crudos con bajo contenido de agua es necesario agregarle agua de lavado (fresca) y agitarlo; de esta manera, al aumentar el número de gotas de agua, aumenta la posibilidad de colisiones.

Un aumento de temperatura también favorece la posibilidad de colisiones, ya que las pequeñas gotas de agua adquieren mayor movimiento al reducirse la viscosidad del petróleo permitiendo que las colisiones sean más violentas.

2. *Coalescencia o agrupamiento de las gotas de salmuera desestabilizadas:*

Los factores que favorecen la colisión de las gotas de agua también favorecen la coalescencia.

En los casos en que la película de emulsionante es muy estable, las gotas de agua no coalescen aunque se produzcan colisiones; se hace necesario agregarle un agente químico (Desemulsificante) que debilite o rompa la película protectora. La coalescencia también se puede proporcionar utilizando campos electrostáticos (desaladores electrostáticos) que polarizan las gotas de agua, es decir, una parte se carga negativamente y la otra positivamente (el agua es una molécula polar). Luego, los extremos de la gota que tienen cargas diferentes se atraen produciendo coalescencia de las gotas.

3. *Separación o decantación de las gotas que coalescen debido al efecto de gravedad:* La decantación de las gotas de salmuera que coalescen requiere de un tiempo de reposo adecuado, el cual puede reducirse calentando el petróleo, ya que así disminuye su viscosidad y las gotas de agua encuentran menor resistencia a su caída.

Esta decantación también se puede favorecer haciendo pasar el petróleo a través de un lecho de agua fresca. Si no se produce coalescencia con solo agregar agua fresca como lavado, esta solo se decantara, pero le habrá restado sal al crudo al diluirse en mayor cantidad de agua; por lo tanto las gotas remanentes tendrán menor concentración de sal.

4. *Productos químicos:* El tratamiento químico de emulsiones requiere de dispersión de un desemulsificante químico o un rompedor de emulsiones. Los productos químicos son compuestos que destruyen o debilitan la emulsión agua – petróleo y a su vez comprimen polímeros con alto peso molecular. Cuando agregamos estos agentes, ellos migran a la interfase agua – aceite y rompen la capa o la debilitan lo suficiente para dispersar las gotas de agua en el aceite y

estas a su vez colisionan y coalescen. La acción desémulsificante se completa con procesos que favorecen la coalescencia y decantación de agua.

5. *Calor:* Varias teorías se han desarrollado para explicar el efecto del calor en el tratamiento de emulsiones. Una teoría supone que unas gotas diminutas tales como las formadas en las emulsiones, están en un movimiento continuo debido al fenómeno del movimiento browniano<sup>10</sup>. Este movimiento se aumenta por el calor, que hace chocar las gotas con más frecuencia y mayor fuerza.

También el propósito del calentamiento es reducir la viscosidad del petróleo y hacer más fácil la sedimentación de los glóbulos de agua. La aplicación de calor también afecta las tensiones interfaciales existentes entre el petróleo y el agua. En efecto cualquier emulsión podrá ser rota por la aplicación del calor a una temperatura igual al punto de ebullición del agua; cuando esa temperatura es alcanzada, los glóbulos de agua se gasifican y rompen sus películas protectoras. Sin embargo la aplicación de calor en tal extremo tiene varias desventajas importantes: un excesivo calentamiento causa pérdidas de los productos o partes más ligeras de hidrocarburos (más volátiles). Esto resulta una pérdida, tanto en volumen como en gravedad, para el productor. Algunos sistemas por los cuales las emulsiones son calentadas son:

- 1) Por inyección de vapor o aire caliente comprimido.
- 2) Calentándolo en un rehervidor o en otro tipo de caldera.
- 3) Indirectamente calentándolo en un intercambiador de calor.
- 4) Calentándolo por pase a través de una capa de agua caliente.

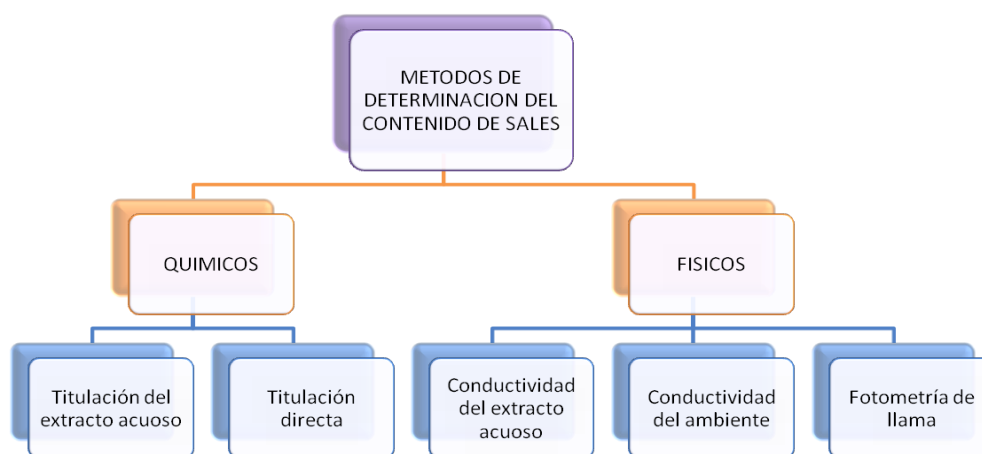
---

<sup>10</sup> Es el movimiento al azar de las partículas suspendidas en un líquido o un gas o del modelo matemático usado para describir tales movimientos.

### 3.4. ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE SAL EN CRUDOS

En diferencia de los métodos de medición de contenido de agua la cantidad de métodos de determinación de contenido de sales en ambientes líquidos no es tan grande. Figura 16.

Figura 16. Métodos de Determinación de sales.



Fuente: Los Autores

El grupo de los métodos químicos se basa en la determinación del contenido de sales por medio de titulación de la solución de sales con un reactivo que interactúan con iones de cloro. Por lo tanto estos métodos determinan solamente el contenido de sales de cloro, el cual se calculan en NaCl. Debido que las sales llegan al crudo principalmente junto con el agua de formación, en la cual predominan las sales de cloro, semejante característica integral para el contenido de sales en el crudo y agua de formación puede considerarse como satisfactoria.

Método de titulación del extracto de sales: es el método más antiguo y al mismo tiempo el más utilizado en la industria. El extracto se obtiene después de una intensa y larga agitación del crudo con agua caliente y con adición de benceno. El defecto del método se encuentra en la larga duración de los análisis y los posibles errores sistemáticos a causa del lavado incompleto de sales en el método de extracción.

*Método de titulación directa o volumétrica:* Se basa en la titulación directa de una muestra de crudo previamente diluida con un disolvente orgánico. Se utiliza titulación potenciométrica con nitrito de plata. La desventaja de ese método es su sensibilidad al hidrogeno sulfurado y los mercaptos.

En presencia de estas sustancias la titulación puede ser completamente irrealizable o presentar un error significativo en la determinación del contenido de sales. Por esta razón el aumento en la proporción de los crudos sulfurados en la producción general de crudos, el método de titulación directo raramente se utiliza.

En el segundo grupo de los métodos físicos se destacan dos métodos análogos y uno químico, en los cuales el proceso de titulación se reemplaza por la medición de conductividad eléctrica del extracto acuoso o del crudo después de su dilución previa con un solvente orgánico.

Debido a que la conductividad eléctrica de cualquier solución se determina según la movilidad de los iones disociados, entonces ambos métodos, basados en medición de la conductividad eléctrica dan una característica más general del

contenido de sales en el crudo, que los métodos químicos, en los cuales se mide solamente el contenido de iones de cloro.

Sin embargo en consecuencia del contenido predominante de sales del cloro en el contenido de sales del agua de formación, entre la conductividad eléctrica y la cantidad de cloro en la solución existe un estrecho enlace, el cual permite realizara su calibrado por uno de los métodos químicos elegido como patrón.

La dependencia de la correlación entre la conductividad eléctrica y el contenido de iones cloruro con respecto al tipo de crudo es una de las principales desventajas de los métodos físicos. Su ventaja, en comparación con los métodos químicos es el corto tiempo de medición.

**3.4.1 Método Aruba (Método de MOHR).** Este método es el más utilizado en los laboratorios para determinar el contenido de sal en crudos por medio de la titulación.

La titulación volumétrica donde se produce un sólido de baja solubilidad se le conoce como titulación de precipitación. Este tipo de titulación es uno de los métodos cuantitativos más antiguos. Una de las desventajas de para que no sea tan común la titulación de precipitación es el hecho de que la formación del sólido es un proceso lento, limitando así la cantidad de agentes precipitantes disponibles para análisis cuantitativo. El agente precipitante por excelencia es  $AgNO_3$ . Las tres formas más comunes de detectar el punto final se basa en cambios en color y la aparición o la desaparición de turbidez en la solución. El método de Mohr es una

titulación de precipitación donde se usa un indicador Cromato de Potasio 10% en concentración que forma un precipitado con el ión de plata. Este precipitado color ladrillo se forma cuando un pequeño exceso de agente titulante ( $AgNO_3$ ) se añade luego del punto estequiométrico de la titulación.

El método de Mohr se puede usar en el análisis de cloruro ( $Cl^-$ ), bromuro ( $I^-$ ) y cianuro ( $CN^-$ ). Se debe tener cuidado con las siguientes dos condiciones que pueden afectar los resultados en el método de Mohr. Primero, se debe llevar a cabo la titulación en un intervalo de pH entre 7 y 10 unidades. La razón es que el Cromato es la base conjugada del ácido débil ácido crómico. El equilibrio entre Cromato y dicromato depende de pH por lo que la concentración en equilibrio de Cromato disponible para formar el precipitado  $Ag_2CrO_4$  se puede variar con pH. Sin embargo, se tiene que tener la precaución de no llevar a cabo la titulación a pH altos ya que puede precipitarse el óxido de plata.

El agua que acompaña al crudo usualmente contiene sales disueltas en concentración variable. La sal predominante es el cloruro de sodio, por lo tanto la salinidad se determina con base a éste compuesto y se expresa generalmente al interior de la industria petrolera como libras de sal por cada mil barriles de crudo. Una de las principales razones por la cual el análisis de salinidad es importante es la de cumplir con los requerimientos de transporte y venta, ya que generalmente los oleoductos y refinerías admiten contenidos de sal bajos, que oscilan entre 10 – 20 libras de sal por cada 1000 barriles de crudo, debido a la acción corrosiva y posteriores daños que generan mayores concentraciones de sal en el fluido.

Los objetivos que se tienen en cuenta al desarrollar este método son los siguientes:

- Realizar la determinación de la salinidad de una muestra de crudo.
- Conocer las unidades en que se manejan las concentraciones de sal en la industria petrolera.
- Reconocer físicamente la naturaleza de las emulsiones de agua y petróleo.
- Ilustrarse sobre la importancia del contenido de sal en un crudo, y su influencia en la calidad del mismo.

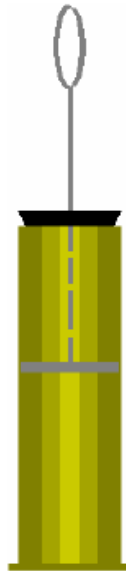
El método presentado a continuación consiste en formar una emulsión entre un volumen determinado de la muestra de crudo y un volumen determinado de agua desmineralizada, con el fin que exista una transferencia del contenido salino del crudo a ésta última. Para esto nos valemos de un cilindro metálico provisto con un émbolo (Figura 17), con el cual se logra crear la emulsión mediante agitación y calentamiento continuo.

Posteriormente mediante el uso de la centrífuga (Figura 18) se buscará retirar por medios físicos las fases que intervienen en la emulsión, para obtener la solución acuosa con el contenido salino y por medio de una titulación calcular la cantidad de sal presente en dicha solución. De acuerdo a esta concentración y conociendo los volúmenes de agua y crudo utilizados en el desarrollo de la práctica, calcular la cantidad de sal presente en el crudo, en las unidades correspondientes.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Norma API RP45. Recommended Practice for Analysis of Oil-field Waters. American Petroleum Institute. Chloride Determination (Mohr Method) Pg 16.

**Figura 17. Cilindro metálico con émbolo.**



Fuente: Guía De Prácticas Para El Laboratorio De Crudos Y Aguas. Germán Zarate- Bogotá.

**Figura 18. Centrífuga.**



Fuente: Guía De Prácticas Para El Laboratorio De Crudos Y Aguas. Germán Zarate- Bogotá.

Procedimiento:

- Tome 50 ml de muestra de crudo en una probeta y viértalos en el cilindro de bronce.
- Lave la probeta que contenía el crudo con 75ml de benceno, agregue además 75 ml. De agua desmineralizada, todo en el cilindro de bronce.
- Coloque el cilindro con todos los líquidos mezclados en un baño a temperatura a 130°F durante 5 minutos, retire el cilindro del baño y agite la mezcla con movimiento rápido de arriba hacia abajo. Introduzca de nuevo el cilindro con la mezcla en el baño durante 10 min.
- Después del calentamiento vierta todo el contenido del cilindro en dos tubos de centrifuga y centrifugue durante 10 min a 1500 rpm.
- Retire el agua del fondo del tubo y fíltrela. Tome 10 ml. De esta agua para hacer la valoración de cloruros. (si de antemano se conoce que el crudo tienen un alto contenido de sal, disminuya la cantidad de agua a valorar). El pH de la solución debe estar entre 7 y 10. Si es necesario ajustar el potencial de hidrogeno use una solución NaOH 0.01N o ácido Nítrico 0.01N.
- Haga la valoración del agua a valorar, usando 2 o 3 gotas de Cromato de potasio como indicador y agregando nitrato de plata como titulador. El punto final se alcanza cuando se observe un color rojizo suave (color ladrillo) durante 30 seg. Si se usa un gotero se asume que cada gota equivale a un volumen de 0.05 ml; en lo posible utilice una bureta para que la titulación sea más exacta. Tenga en cuenta que cualquier pequeño cambio en el volumen de nitrato de plata utilizado, puede alterar considerablemente los resultados finales.

El volumen de nitrato de plata usado durante la valoración se registra como  $V_n$ . Si el ensayo realizado en blanco arroja algún dato de volumen de nitrato de plata  $V_b$  debe hacerse la diferencia de volúmenes mediante la ecuación (8):

$$V_n = V_{n\ total} - V_b \quad (8)$$

Las libras de sal/ 1000 BBI se obtiene usando la ecuación (10):

Donde:

$$Q = lb. \frac{sal}{1000} BL\ crudo \quad (9)$$

$$Q = 30726.84 \left( \frac{V_n N_n}{V_h} \right) \quad (10)$$

$N_n$  = Normalidad del  $AgNO_3$

$V_n$  = Volumen de  $AgNO_3$  usado en la titulación. *ml*

$V_h$  = Volumen de agua a valorar. *ml*

**3.4.2 Método Electrométrico (Norma ASTM D 3230)** Este método cubre la determinación de la concentración aproximada de cloruros (sales) en el aceite crudo. El rango de medida es de 0 a 500 mg/kg o 0 a 150 lb/1000bbl de concentración de sal/volumen de aceite. También mide la conductividad en el crudo debido a la presencia de cloruros comunes, tales como sodio, calcio y magnesio. Otros materiales conductivos también pueden estar presentes en el crudo.

Las unidades de concentración aceptable al utilizar este método son g/m<sup>3</sup> o PTB (lb/1000bbl).

### Resumen del método

Este método de prueba mide la conductividad de una solución de crudo en una mezcla de alcohol solvente cuando es sometido a una corriente eléctrica. Este método mide conductividad debido a la presencia de cloruros inorgánicos, y otros materiales conductivos en el crudo. Un espécimen de prueba es disuelto en una mezcla de alcohol solvente y llevado a una celda de prueba consistente de un frasco y un juego de electrodos. Un voltaje es impuesto en los electrodos y la corriente eléctrica resultante es medida. El contenido de cloruros es obtenido por referencia a la curva de calibración de corriente versus el contenido de sal en mezclas conocidas. Las curvas de calibración están basadas en estándares preparados para aproximar el tipo y concentración de cloruros en el crudo objeto de la prueba.

### Uso e importancia

Este método es usado para determinar el contenido aproximado de cloruros en el aceite crudo, cuyo conocimiento es importante en las decisiones de si el crudo necesita o no proceso de desalación. Al aplicar este método en la industria también se puede evaluar la eficiencia del proceso de desalado.

El exceso de cloruros deja en el crudo resultados frecuentes con altas tasas de corrosión en las unidades de refinado y también tienen resultados perjudiciales sobre los procesos de catálisis usados en estas unidades.

Este método de prueba brinda una forma rápida y conveniente de determinar el contenido aproximado de cloruros en el crudo y es de gran utilidad en los procesos del mismo.

### Aparatos

El aparato (ver Anexo C) consiste de una unidad capaz de producir y mostrar algunos niveles de voltaje, aplicando una corriente a un juego de electrodos suspendidos en una celda de prueba que contiene la muestra de solución.

El aparato debe ser capaz de medir y mostrar la corriente conducida a través de la muestra de solución entre los electrodos en cada nivel de voltaje.

*Celda de prueba – ver Anexo C.*

*Pipeta, 10 mL (entrega total)*

*Frasco de vidrio de 100 mL*

*Otras pipetas graduadas y volumétricas*

### Materiales y reactivos

Pureza de los reactivos: El grado químico de los reactivos debe ser usado en todas las pruebas. Todos los reactivos deben ser conforme a las especificaciones de la American Chemical Society, donde tales especificaciones están disponibles.

Se pueden usar reactivos de diferentes grados pueden ser usados, con teniendo la certeza del reactivo es lo suficientemente puro para permitir su uso sin disminuir la exactitud de su determinación.

Pureza del agua: Las referencias al agua deben darse según especificación D1193.

Mezcla de alcohol solvente: Por cada litro de esta mezcla, adicionar 3 mL de agua.

Hexanos: Reactivos (peligro extremadamente inflamable y dañino si se inhala.)

Solución de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) (10 g/L): Transferir  $1.006 \pm 0.01$  g de  $\text{CaCl}_2$ , o el equivalente en peso de una sal hidratada, en un matraz aforado de 100-mL y disolver 25 mL de agua. Diluir hasta la marca con mezcla de alcohol solvente.

Solución de cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ) (10g/L): Transferir  $1.00 \pm 0.01$  g de  $\text{MgCl}_2$ , o su equivalente en peso de una sal hidratada, en un matraz aforado de 100-mL y disolver en 25-mL de agua. Diluir hasta la marca con mezcla de alcohol solvente.

Solución de cloruro de sodio (NaCl) (10g/L): Transferir  $1.00 \pm 0.01$  g de NaCl en un matraz aforado de 100-mL y disolver en 25-mL de agua. Diluir hasta la marca con mezcla de alcohol solvente.

Aceite natural refinado: Cualquier cloruro refinado libre de aceite de aproximadamente  $20 \text{ mm}^2/\text{seg}$  (cSt) de viscosidad a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  y libre de aditivos.

Mezcla de solución salina (solución concentrada): Mezclar 10.0 mL de solución  $\text{CaCl}_2$ , 20.0 mL de solución  $\text{MgCl}_2$ , y 70 mL de solución  $\text{NaCl}$ , y mezclar fuertemente.

Solución salina (solución diluida): Transferir 10 ml de la mezcla de solución de cloruro concentrada en un matraz aforado de 100 mL, y diluir hasta la marca con mezcla de alcohol solvente.

Xileno, pureza mínima.

### Muestreo

Obtener una muestra y probarla de acuerdo al método D4928. Asegurar que la muestra es completamente homogénea con una mezcla apropiada. Ver anexo.

Muestras de aceite que contiene agua y sedimentos y que son heterogéneas por naturaleza, la presencia de agua y sedimentos influenciara la conductividad de la muestra, por lo que deberá usarse mezclas homogéneas.

### Preparación del aparato

- Instalar el aparato en una superficie estable, tal como una mesa.
- Preparar el aparato para operación de acuerdo con las instrucciones del fabricante para calibración, chequeo y operación del equipo.

- Limpiar y secar cuidadosamente todas las partes de la celda de prueba, los electrodos, y sus accesorios antes de iniciar la prueba, estando seguro de remover cualquier solvente que ha sido usado para limpiar el aparato.

### Calibración

La conductividad de una solución es afectada por la temperatura de la muestra. Cuando se realizan las medidas la temperatura de la muestra en el tiempo de medición debe estar en un rango de 3°C de la temperatura para la cual fueron hechas las curvas de calibración.

Cuando la corriente es mayor que 0.25 mA a 125 V CA, agua y otras impurezas conductivas están presente y su fuente debe ser encontrada y eliminada antes de que la calibración sea completada. Se debe determinar una medida estándar cada vez que xileno fresco o solvente sea usado.

En un cilindro graduado de 100 mL, agregar 15 mL de xileno. En una pipeta agregar 10 mL de aceite neutral. Enjuagar la pipeta con xileno hasta que este libre de aceite. Llevar a 50 mL de xileno. Agitar vigorosamente por aproximadamente 60 s para efecto de la solución.

Agregar una cantidad de solución salina diluida de acuerdo a la tabla 1, que es apropiada para el rango de contenido de sal a ser medido, diluir hasta 100 mL con

alcohol solvente. Agitar de nueva el cilindro vigorosamente por aproximadamente 30 s para efecto de la solución, y dejar la solución quieta aproximadamente 5 min. Vierta la solución en la celda de prueba seca.

Colocar inmediatamente los electrodos en la celda de prueba, asegurándose que el electrodo superior se encuentra bajo la superficie de la solución. Ajustar el voltaje del electrodo a una serie de valores por ejemplo 25, 50, 125, 200 y 250 V a.c. en cada voltaje anote la lectura de corriente y voltaje.

Remover los electrodos de la solución, enjuagar con xileno seguido con nafta y dejarlos secar.

Repetir el procedimiento usando otros volúmenes de solución salina mezclada (solución diluida) para cubrir el rango de contenido de cloruros de interés.

Restar el valor obtenido de la medida estándar de las lecturas de corriente indicada de cada muestra y graficar contenido de cloruro contra corriente mA para cada voltaje en 3x3 ciclos en log-log, u otro formato manejable.

**Tabla 1. Muestras Estándar.**

Salt, g/m <sup>3</sup> of Crude Oil	Salt, Lb/1000bbl of Crude Oil	Mixed Salts Solution (dilute), mL
3	1.0	0.3
9	3.0	1.0
15	5.0	1.5
30	10.0	3.0
45	16.0	4.5
60	21.0	6.0

**Tabla 1. (Continua)**

75	<b>26.0</b>	<b>8.0</b>
90	31.0	9.5
115	40.0	12.0
145	51.0	15.0
190	66.0	20.0
215	75.0	22.5
245	86.00	25.5
290	101.0	30.5
430	151.0	45.0

Fuente: Norma ASTM D3230

### Procedimiento.

En un cilindro graduado de 100 mL agregar 15 mL de xileno y agregar 10 mL de la muestra de crudo. Enjuague la pipeta con xileno hasta que esté libre de aceite.

Complete con 50 mL de xileno, agite por aproximadamente 50 segundos diluir a 100 mL con alcohol solvente. Y agitar de nuevo por 30 s. luego dejar reposar por aproximadamente 5 min, verter dentro de la celda de prueba seca.

Obtener las lecturas de voltaje y corriente, anotar las lecturas cercanas a 0.01 mA y el voltaje cercano.

Remover los electrodos de la solución y limpiar el aparato.

## Cálculos

Restar del valor obtenido para la lectura en blanco del valor obtenido del espécimen medido para obtener la lectura de corriente neta.

De la grafica de calibración, leer la concentración de sal indicada correspondiente a la lectura de corriente de la muestra.

Calcular la concentración en mg/kg usando la ecuación apropiada

$$\text{salt, } \frac{Mg}{Kg} = \frac{1000x}{d} \quad (11)$$

$$\text{salt, } \frac{Mg}{Kg} = \frac{2853Y}{d} \quad (12)$$

Donde:

$X$  = Medida de concentración de Sal en  $g/cm^3$

$Y$  = Medida de la concentración de sal en in PTB

$d$  = Densidad de la muestra. 15 C en  $Kg/m^3$

## Reporte

Reporte la siguiente información: la concentración en mg/kg como medida electrométrica para aceite crudo por el método de prueba D3230. Alternativamente, reporte la concentración en g/m<sup>3</sup> p lb/100bbl si es necesario.

### **3.5 PROCESO DE DESALACION DE CRUDO**

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

Después de la deshidratación o del rompimiento de la emulsión, el petróleo crudo todavía contiene un pequeño porcentaje de agua remanente. Los tratamientos típicos del aceite anteriormente mencionados (adición de desemulsificante, calentamiento sedimentación y tratamiento electrostático) pueden reducir el porcentaje de agua del crudo a rangos de 0.1-1.0% volumen. Este valor de 0.1-1.0% agua consiste en numerosas gotas de agua dispersas en el seno del crudo.

La salinidad de la salmuera puede variar desde 1000 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 (2-15% peso) de sales disueltas. El contenido de sal en el crudo normalmente es medido en libras de cloruros, expresado como

cloruro de sodio equivalente, por 1000 barriles de crudo limpio (Libras por Mil Barriles –LMB-, Pounds Per Thousand Barrels – PTB).

Cuando el crudo es procesado en las refinerías, la sal puede causar numerosos problemas operativos. Las incrustaciones de sal en los equipos causan disminución de flujo, taponamiento, reduce la transferencia de calor en los intercambiadores, taponas los platos de las torres fraccionadoras. La salmuera también es 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 a menos de 1 Libra por Mil Barriles (LMB). Esta corrosividad de la salmuera producida ha resultado también en especificaciones en el contenido de salinidad del crudo de 20-30LMB para el transporte en carrotanques o ductos.

El desalado en campo reduce la corrosión corriente abajo (bombeo, ductos, tanques de almacenamiento, carrotanques). Adicionalmente la salmuera producida puede ser adecuadamente tratada para que no cause los daños mencionados en los equipos y sea inyectada al yacimiento, resolviendo el problema ambiental que esto podría generar.

En ausencia de cristales de sal sólidos, el contenido de sal en el crudo deshidratado (LMB) está directamente relacionado con el porcentaje de agua y la concentración de salinidad de la salmuera (ppm de NaCl), de la siguiente forma:

$$lbsal = (bl\ crudo) \left( \frac{bl\ agua}{bl\ crudo} \right) \left( \frac{lb\ agua}{lb\ crudo} \right) \left( \frac{lb\ sal}{lb\ agua} \right) \quad (13)$$

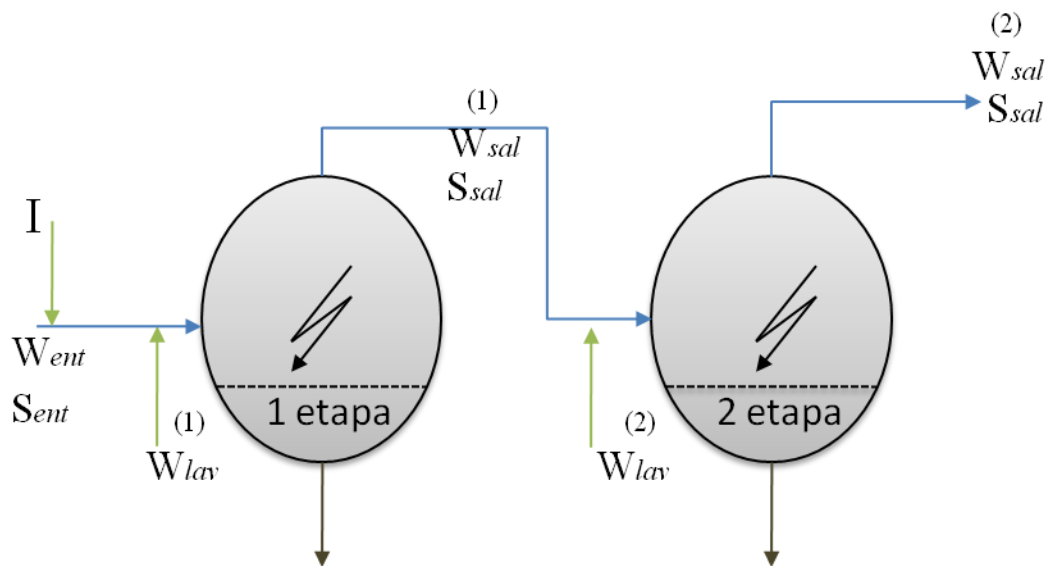
Usando como base convencional de 1,000 bbl de crudo limpio se utiliza la ecuación (14):

$$LMB = (1000) \left( \frac{\% \text{ agua}}{100 - \% \text{ agua}} \right) (350GE_{\text{agua}}) \left( \frac{\text{ppm peso}}{10^6} \right) \quad (14)$$

La ecuación anterior se utiliza para calcular el contenido de sal en el crudo para un nivel de deshidratación/desalado expresado como % volumen remanente de agua y salinidad.

La desalación de los crudos se realiza de acuerdo con el esquema básico presentado en la figura 19.

**Figura 19. Esquema principal del Proceso de desalación.**



Fuente: LOGINOV pg. 45

El crudo que contiene  $W_{ent}$  de agua y salinidad  $S_{ent}$  se suministra a la planta de desalación. Antes de la primer etapa el crudo se calienta y se le agrega un tecnológicos de desalación; automatización y optimización de las plantas de desalación; síntesis de nuevos agentes desemulsificantes de alta efectividad etc.

El desalado, el cual continúa después de un proceso de rompimiento de la emulsión y deshidratación consiste de los siguientes pasos:

agente desemulsificante y agua de lavado  $W_{lav}$ . Después de mezclar intensivamente el crudo con el agua de lavado, la emulsión así formada se suministra al deshidratador eléctrico. Las sales del crudo salen con el agua.

Después de la primera etapa de desalación, el crudo con el contenido del agua  $W_{sal}^{(1)}$  y la salinidad  $S_{sal}^{(1)}$  se suministra a la segunda etapa de desalación. Antes de la II etapa de nuevo se le adiciona al crudo agua dulce de lavado  $W_{lav}^{(2)}$ . Luego de ser separada el agua en la segunda etapa, el crudo producto (o crudo comercial) con el contenido de agua  $W_{sal}^{(2)}$  y de sales  $S_{sal}^{(2)}$  se dirige a la refinación.

En la actualidad la modernización de los procesos de desalación se orientan hacia: construcción y perfeccionamiento de modernos aparatos de separación de agua como lo son los electrodeshidratadores; creación de los nuevos esquemas

Adición de agua de dilución (o menos salina) al crudo.

1. Mezclado del agua de dilución con el crudo.
2. Deshidratación (tratamiento de la emulsión) para separar el aceite crudo y la salmuera diluida.

## **4. PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA ELECTROMÉTRICA**

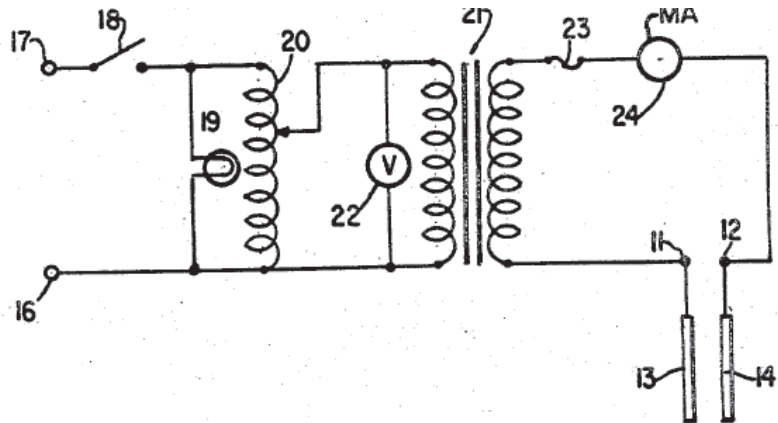
En el diseño de esta herramienta se definen las reglas básicas para su realización y análisis, teniendo en cuenta las posibles situaciones de campo en las que se debe o puede ser utilizada.

La utilización de esta herramienta es de gran beneficio para el desarrollo y seguimiento de los proyectos posteriores de refinación y tratamiento del crudo, para mejorar la calidad del mismo teniendo en cuenta siempre eficiencia y eficacia en los procesos.

### **4.1 COMPONENTES DEL EQUIPO**

**4.1.1 Circuitos de referencia.** En el desarrollo de este proyecto se tomaron como referencia los circuitos planteados en la patente “Método y aparato para determinación de la cantidad de sal en hidrocarburos líquidos” Figura 20 registrada en Abril 27 de 1965 en la oficina de patentes de los Estados Unidos y la norma ASTM D3230 “Método estándar de prueba para sales en hidrocarburos líquidos (Método Electrométrico)” Figura 21.

Figura 20. Método y aparato para determinación de la cantidad de sal en hidrocarburos líquidos.



Fuente: Patente 3, 181,058.

Figura 21. Aparato para método electrométrico.

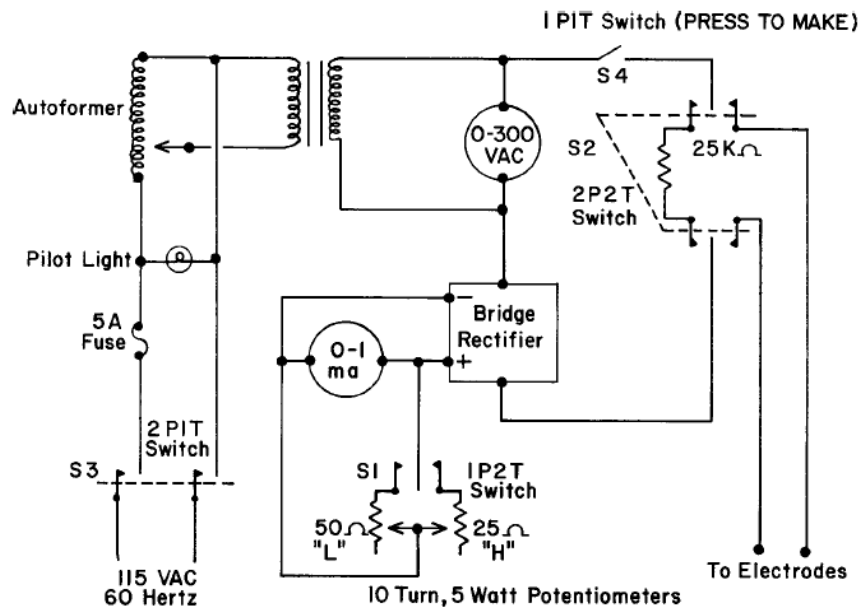
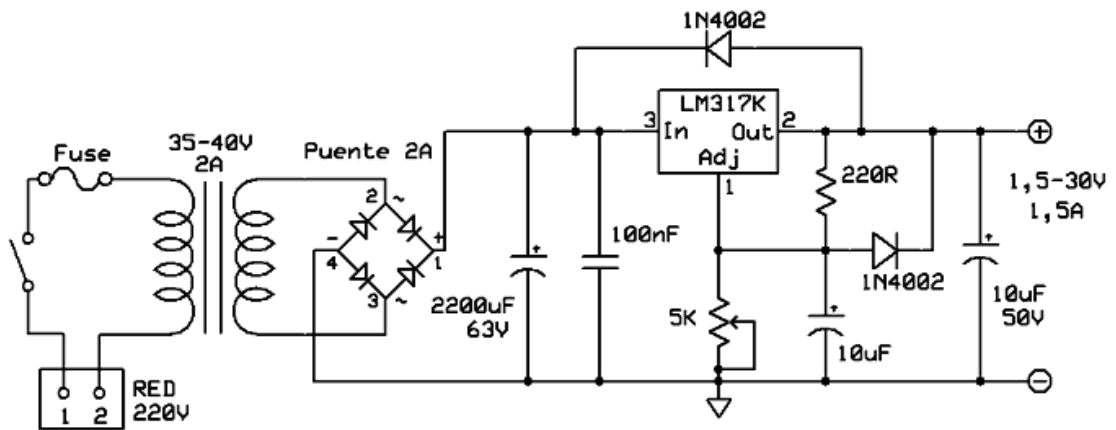


FIG. A1.1 250 or 540 Volt Transformer

Fuente: Norma Astm D 3230

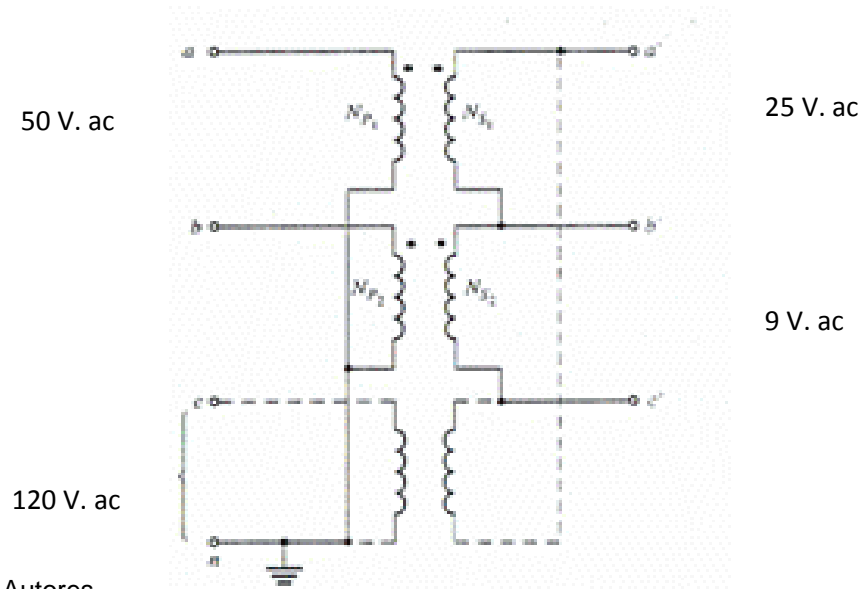
**4.1.2 Circuitos Elaborados.** Se plantearon dos circuitos electrónicos que generan corriente directa (Figura 22) y corriente alterna (Figura 23) respectivamente.

**Figura 22. Circuito de corriente directa.**



Fuente: Los Autores

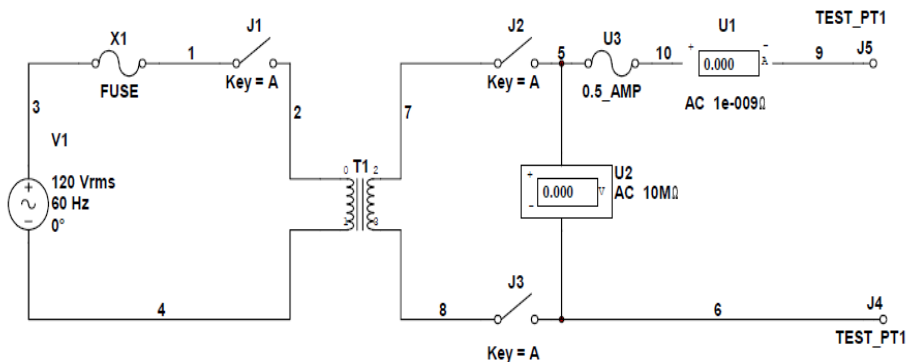
**Figura 23. Circuito corriente alterna.**



Fuente: Los Autores

Durante esta investigación se realizó la comparación de los resultados de las medidas de corriente obtenidas con los circuitos planteados anteriormente, para seleccionar el más adecuado que cumpla con especificaciones técnicas y proporcione las mejores relaciones de eficiencia, calidad, costos y precisión. De acuerdo con lo anterior el circuito final de la herramienta se presenta a continuación en la figura 24.

**Figura 24. Circuito Definitivo de la herramienta Electrométrica.**



Fuente: Los Autores

**4.1.3 Medición de corriente y voltaje en el equipo.** Los componentes fundamentales de la herramienta diseñada son el voltímetro y el amperímetro (Figura 25). Para la selección de estos aparatos se realizaron las pruebas de laboratorio utilizando multímetros digitales los cuales permitieron elegir el tipo de corriente a usar (alterna/directa) y obtener los rangos de medida adecuados dando una mayor precisión en los resultados.

Figura 25. Multímetros digitales



Fuente: Los Autores

Tabla 2. Escalas de voltímetros y Amperímetros.

Amperios A.C	Amperios D.C	Voltaje A.C	Voltaje D.C
<b>0-19.99 mA</b>	0-19.99 mA	0-199.9 mV ( 0.1 mV )	0-199.9 mV ( 0.1 mV )
<b>0-199.9 mA</b>	0-199.9 mA	0-1.999 V ( 1 mV )	0-1.999 V ( 1 mV )
<b>0-19.99A</b>	0-19.99A	0-19.99 V ( 10 mV )	0-19.99 V ( 10 mV )
<b>0-199.9A</b>	0-199.9A	0-199.9 V ( 0.1 V )	0-199.9 V ( 0.1 V )
<b>0-1999A</b>	0-1999A	0- 1999 V ( 1 V )	0- 1999 V ( 1 V )

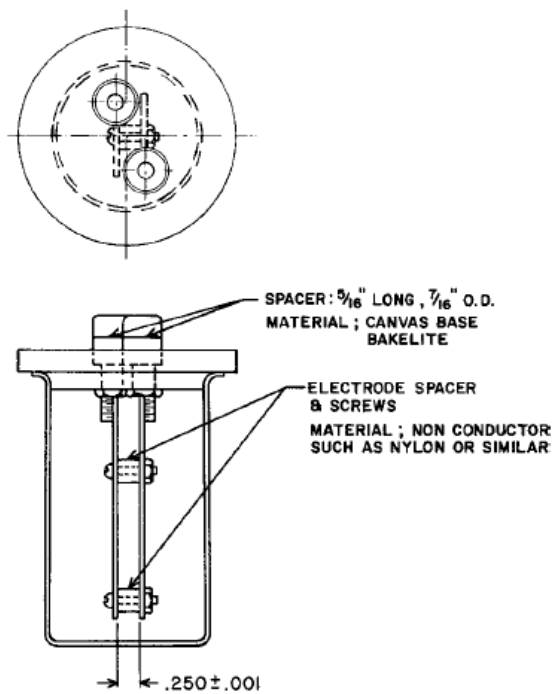
Fuente: Los autores.

Basados en las mediciones realizadas durante el experimento se seleccionó para la construcción del equipo definitivo un amperímetro LightStart 0-199 mA y un voltímetro LightStart 0-199.9 V.

## 4.2 COMPONENTES DE LA CELDA DE PRUEBA

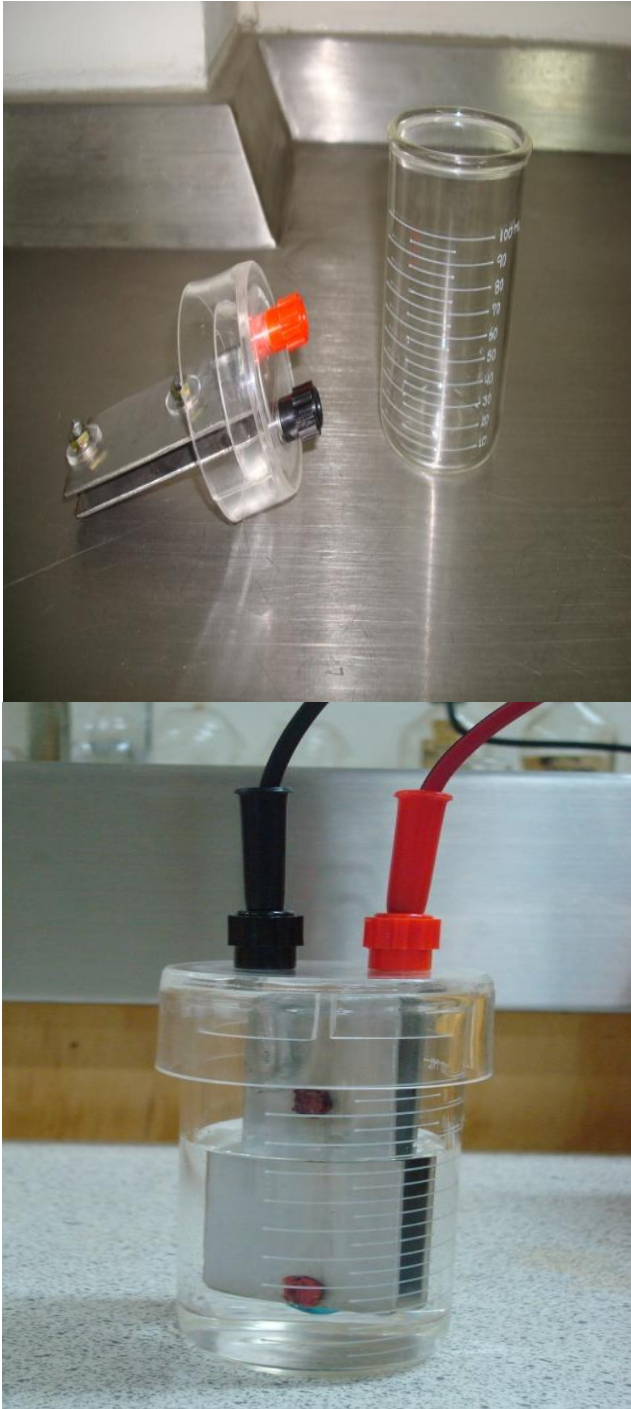
La celda implementada ha sido construida teniendo en cuenta las recomendaciones presentadas en la norma ASTM D3230. Esta celda esta compuesta por un frasco en material de vidrio de forma cilíndrica con capacidad de 100mL, el cual tiene una tapa en material acrílico con una adaptación de dos electrodos de acero inoxidable con dimensiones de 7cm x 3cm separados 6 mm, estos electrodos están unidos a dos terminales que permiten la conexión con el equipo por medio de sus respectivos cables. El esquema de la celda se presenta en la Figura 26 y 27.

Figura 26. Celda de Prueba.



Fuente: Norma ASTM D3230

Figura 27. Celda de Prueba.



Fuente: Los Autores

## 5. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 5.1 FASE I

En el planteamiento de esta fase se tiene en cuenta principalmente la calibración de la herramienta con la conductividad de las diferentes sustancias usadas durante la prueba como son: Agua desmineralizada, Solución salina, Solvente no polar, Solvente polar y crudo base previamente deshidratado (Campo Colorado).

La corriente que circula a través de estas sustancias se mide para diferentes valores de voltaje, de esta forma se determina la conductividad de referencia para la calibración del equipo.

**Tabla 3. Datos de Calibración con aditivos del procedimiento.**

<b>Agua desmineralizada</b>	<b>Solución salina 10g/L</b>	<b>Solvente No polar</b>	<b>Solvente Polar</b>	<b>Crudo base deshidratado</b>
9 V.A.C	9 V.A.C	9 V.A.C	9 V.A.C	9 V.A.C
25 V.A.C	25 V.A.C	25 V.A.C	25 V.A.C	25 V.A.C
50 V.A.C	50 V.A.C	50 V.A.C	50 V.A.C	50 V.A.C
120 V.A.C	120 V.A.C	120 V.A.C	120 V.A.C	120 V.A.C
5 V.D.C	5 V.D.C	5 V.D.C	5 V.D.C	5 V.D.C
10 V.D.C	10 V.D.C	10 V.D.C	10 V.D.C	10 V.D.C
20 V.D.C	20 V.D.C	20 V.D.C	20 V.D.C	20 V.D.C

Fuente: Los Autores

## 5.2 FASE II

En el desarrollo de esta fase se define la cantidad de muestra y el tiempo utilizados en el procedimiento mencionado a continuación de acuerdo con la Norma ASTM D-3230.

**Figura 28. Optimización del tiempo en el procedimiento.**



Fuente: Los Autores

Con el fin de optimizar la herramienta se plantea la selección de otros aditivos diferentes a los mencionados en la norma debido a la dificultad para adquirirlos. Para esto se realiza el procedimiento planteado en la norma ASTM D-3230, utilizando dos tipos de solvente no polar: Thinner y Varsol.

## **PROCEDIMIENTO (Sugerido por Los Autores)**

En un cilindro graduado de 100 mL agregar 15 mL de solvente no polar y agregar 10 mL de la muestra de crudo. Enjuagar la pipeta con solvente no polar hasta que esté libre de aceite.

Completar con 50 mL de solvente no polar, agitar por aproximadamente 60 segundos diluir a 100 mL con alcohol solvente. Y agitar de nuevo por 30 s. luego dejar reposar por aproximadamente 5 min, verter dentro de la celda de prueba seca.

Ubicar los electrodos en la celda de prueba, asegurándose que el electrodo superior se encuentra bajo la superficie de la solución. Ajustar el voltaje del electrodo a una serie de valores: 9, 25, 50 y 120 V.A.C y 5,10 y 20V.D.C. En cada voltaje se toma la lectura de corriente.

Remover los electrodos de la solución, enjuagar con Solvente no polar y dejarlos secar.

### **5.3 FASE III**

En esta fase se plantean los escenarios a modelar con el crudo base (deshidratado), los cuales contemplan las siguientes especificaciones:

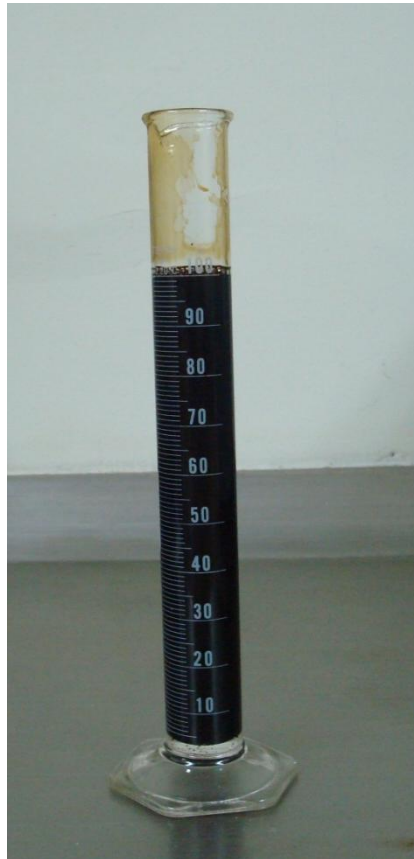
- El primer aspecto variable en cada escenario es el porcentaje de agua. El primer valor tomado se eligió bajo el criterio de especificación normativa de la cantidad de agua máxima permitida para la comercialización del crudo. Los otros cuatro valores se escogieron manteniendo una misma proporción del doble entre cada uno.
- Otro aspecto a tener en cuenta en el desarrollo de la prueba es la concentración de sal en Lb/1000Bl. Para analizar la influencia de esta variable, se toman seis concentraciones de sal diferentes. Los dos primeros valores tomados varían de acuerdo con la especificación normativa del tope máximo de salinidad en Colombia para la comercialización del crudo, los otros 3 valores varían el doble manteniendo esta proporción y el último valor es la máxima cantidad de sal medible que se encuentra en el rango de la norma ASTM D-3230.

### **Elaboración de las muestras de crudo utilizadas en el experimento**

Para elaborar cada muestra de crudo se toma una probeta de 100 mL, se agrega el porcentaje de agua desmineralizada (0.5, 2.5, 5, 10 y 20 mL) respectivamente, luego se completa con el crudo base hasta 100 mL. Con la ayuda de un agitador se forma la emulsión, de la cual se toman los 10 mL usados en la prueba. Figura 29.

Para variar las concentraciones de sal sugeridas en esta fase, se crea una solución salina con tres diferentes tipos de sales ( $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $NaCl_2$ ) que se pueden encontrar en un gran número de crudos.

**Figura 29. Muestra de Crudo elaborada.**



Fuente: Los Autores

Procedimiento para elaborar la solución salina:

1. Transferir 1 g de  $CaCl_2$  en una probeta de 100 mL. Disolver en 25 mL de agua y diluir hasta 100mL con alcohol solvente.
2. Transferir 1 g de  $MgCl_2$  en una probeta de 100 mL. Disolver en 25 mL de agua y diluir hasta 100mL con alcohol solvente.
3. Transferir 1 g de  $NaCl$  en una probeta de 100 mL. Disolver en 25 mL de agua y diluir hasta 100mL con alcohol solvente.

4. Combinar 10 mL de solución  $CaCl_2$ , 20 mL de solución  $MgCl_2$ , y 70 mL de solución  $NaCl$  y agitar fuertemente.
5. Transferir 10 mL de la solución anterior en un frasco de 1000 mL y diluir a la marca con alcohol solvente.

Esta solución salina se agrega a las muestras de crudo durante la prueba como se referencia en la tabla y en el Anexo C.

**Tabla 4. Cantidad de Solución Salina en la muestra.**

<b>lb/1000bbbl</b>	<b>mL solución salina</b>
7	2,17
15	4,65
25	7,74
50	15,49
100	30,97
161,4	50,00

Fuente: Los autores

Se realiza la combinación de la solución salina con la muestra de crudo base para lograr la concentración de sal requerida y así obtener en total 30 muestras de fluido para medir la corriente (mA) que circula a través de ella a diferentes niveles de voltaje de acuerdo con el procedimiento mencionado en la fase II.

**Tabla 5. Tabla para toma de datos.**

<b>VOLTAJE(A.C/D.C)</b>						
<b>Concentración sal (Lb/1000Bl)</b>	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>161.4</b>
<b>% Agua</b>						
<b>0.5</b>	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A
<b>2.5</b>	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A
<b>5</b>	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A
<b>10</b>	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A
<b>20</b>	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A	m.A

Fuente: Los Autores

#### **5.4 FASE IV**

En esta fase se utiliza el método de Mohr para comprobar la concentración de sal de los crudos sintéticos elaborados en la fase III. El análisis se realiza a la solución usada para preparar los crudos sintéticos.

**Tabla 6. Toma de datos Método de MOHR.**

Concentración sal (Lb/1000Bl)	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>161.4</b>
Solución salina						
Método Mohr	# gotas $AgNO_3$	# gotas $AgNO_3$	# gotas $AgNO_3$	# gotas $AgNO_3$	# gotas $AgNO_3$	# gotas $AgNO_3$

Fuente: Los Autores

La concentración de sal se determina de acuerdo al número de gotas de Nitrato de Plata usadas en la titulación con base en la siguiente ecuación:

$$K \left( \frac{V_n N_n}{V_h} \right) \quad Q = \quad (15)$$

$N_n$  = Normalidad del  $AgNO_3$

$V_n$  =Volumen de  $AgNO_3$  usado en la titulación. *ml*

$V_h$  = Volumen de agua a valorar. *ml*

**Relación Gotas de titulador-Concentración de sal.**

Gotas de Nitrato de Plata	Lb/1000BBL
<b>1</b>	4.33
<b>2</b>	8.66
<b>3</b>	13.00
<b>4</b>	17.33
<b>6</b>	25.99
<b>12</b>	51.99
<b>13</b>	56.32
<b>24</b>	103.98
<b>38</b>	164.63

Fuente: Los Autores

Al realizar este análisis se podrá comparar la exactitud de los dos métodos utilizados en laboratorio para la determinación de cloruros en crudo (Método electrométrico y Método de Mohr).

## 5.5 FASE FINAL

En esta fase se realiza la medición de corriente con el equipo a muestras de crudo con concentraciones de sal desconocidas correlacionándolas simultáneamente con los resultados obtenidos en la fase II y el método de titulación (Mohr).

**Tabla 7. Tabla de datos. Fase Final.**

<b>Muestra</b>	<b>°API</b>	<b>Corriente</b>	<b>Aproximación electrométrica</b>	<b>Método Mohr</b>
CRUDO BASE	°API	mA	Lb/1000bbl	Lb/1000bbl
CRUDO A	°API	mA	Lb/1000bbl	Lb/1000bbl
CRUDO B	°API	mA	Lb/1000bbl	Lb/1000bbl
CRUDO C	°API	mA	Lb/1000bbl	Lb/1000bbl

Fuente: Los Autores

Al finalizar el procedimiento de esta fase se puede comparar la eficiencia y precisión de los dos métodos utilizados en la determinación del contenido de cloruros o sales disueltas en el crudo.

## 6. ANALISIS DE RESULTADOS

### 6.1 FASE I

Esta fase se inició con la medición de la corriente que circula a través de la celda llena con agua desmineralizada a diferentes niveles de voltaje de C.A y C.D.

Tabla 8. Conductividad del agua desmineralizada.

VOLTAJE	AGUA DESMINERALIZADA(100 mL)
9 A.C	0
25 A.C	5.4
50 A.C	10
120 A.C	17.2
5 D.C	0.6
10 D.C	1.7
20 D.C	4.6

Fuente: Los Autores

Luego de realizar la toma de datos respectiva se puede observar que el agua desmineralizada tiene buena conductividad a pesar de que no contiene iones en solución, por lo tanto es de esperar que la medida de corriente en crudos con alto contenido de agua se vea afectada por la misma y requiera alguna corrección.

El segundo aspecto analizado en esta fase, fue la selección del solvente no polar apropiado para ser utilizado en el procedimiento. Los dos tipos de solventes probados fueron thinner y varsol.

**Tabla 9. Conductividad de Solventes No Polares.**

<b>VOLTAJE</b>	<b>THINNER(100 mL)</b>	<b>VAR SOL(100 mL)</b>
9 A.C	0.2	0
25 A.C	0.8	0
50 A.C	1.7	0
120 A.C	4.3	0
5 D.C	0.13	0
10 D.C	0.29	0
20 D.C	0.57	0

Fuente: Los Autores

De acuerdo con los resultados obtenidos en la medición de corriente de cada uno de los solventes, se selecciono el varsol como el solvente mas apropiado para las pruebas de laboratorio debido a la conductividad nula que presentó en su análisis de conductividad, lo cual no afecta la lectura de corriente en la celda de prueba.

La ultima sustancia analizada en esta fase es el solvente Polar, el cual al realizar la medición de corriente se observó que tiene una baja conductividad que posiblemente puede afectar los resultados obtenidos durante el procedimiento.

**Tabla 10. Conductividad del Solvente Polar.**

<b>VOLTAJE</b>	<b>ETANOL (100 mL)</b>
9 A.C	0.5
25 A.C	1.41
50 A.C	2.86
120 A.C	7
5 D.C	0.16
10 D.C	0.39
20 D.C	0.83

Fuente: Los Autores

El análisis general de esta fase permitió concluir que es necesario realizar una corrección a las medidas de corriente obtenidas en el procedimiento general de la prueba, para eliminar el efecto de la conductividad del agua desmineralizada y el alcohol solvente.

## **6.2 FASE II**

Se realizaron las medidas de conductividad del crudo base con los dos solventes no polares sugeridos en la fase anterior. Con estos resultados se confirma que efectivamente el varsol causa un efecto menor en las mediciones de corriente realizadas a la muestra de crudo aplicando diferentes voltajes.

**Tabla 11. Conductividad de Crudo Base.**

<b>VOLTAJE</b>	<b>CRUDO BASE -THINNER</b>	<b>CRUDO BASE -VARSOL</b>
9 A.C	0.92	0.38
25 A.C	2.35	1
50 A.C	4.72	2
120 A.C	11.5	4.94
5 D.C	0.31	0.15
10 D.C	0.73	0.34
20 D.C	1.58	0.73

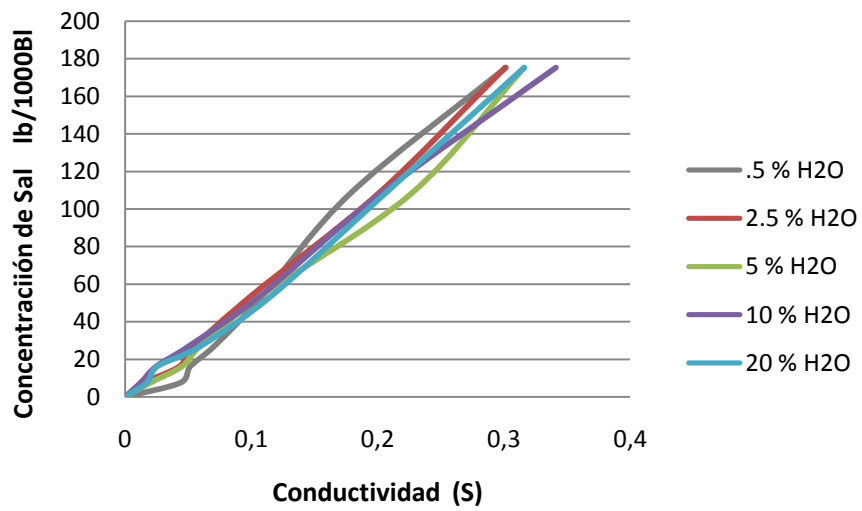
Fuente: Los Autores

Durante el desarrollo de este experimento se realizaron las mediciones de corriente con variaciones de tiempo, tomando las medidas instantáneamente y dejando la mezcla en reposo durante un tiempo de 5 minutos como lo sugiere la norma ASTM D3230. Al realizar estas mediciones se observa que los resultados obtenidos dejando la muestra en reposo son mas heterogéneos que tomando las lecturas de corriente inmediatamente después de realizar la mezcla.

De acuerdo con los análisis realizados anteriormente, se plantea una variación en el procedimiento general de la norma anulando los cinco minutos de reposo de la muestra que se sugieren en la norma ASTM y de esta manera eliminar la falta de precisión en las medidas tomadas.

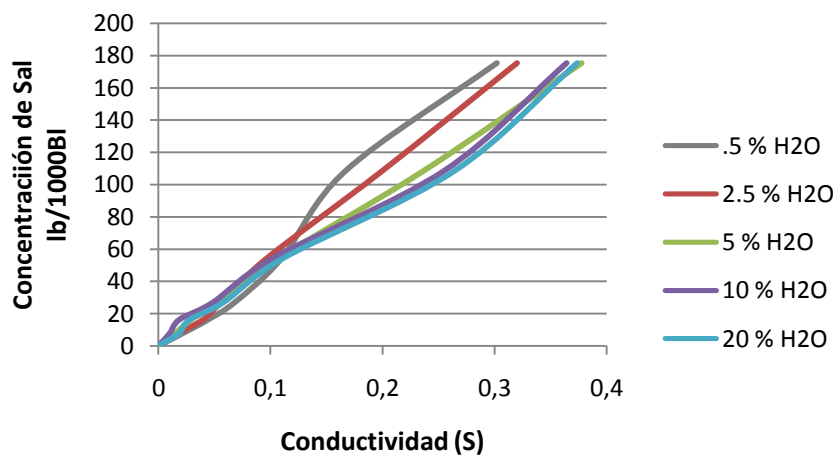
En las siguientes graficas se puede observar que la tendencia de los datos es mas dispersa cuando se trabaja con la mezcla en reposo.

Figura 30 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 25 VAC con tiempo de 0 min.



Fuente: Los Autores

Figura 31 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 25 VAC con tiempo de 5 min.

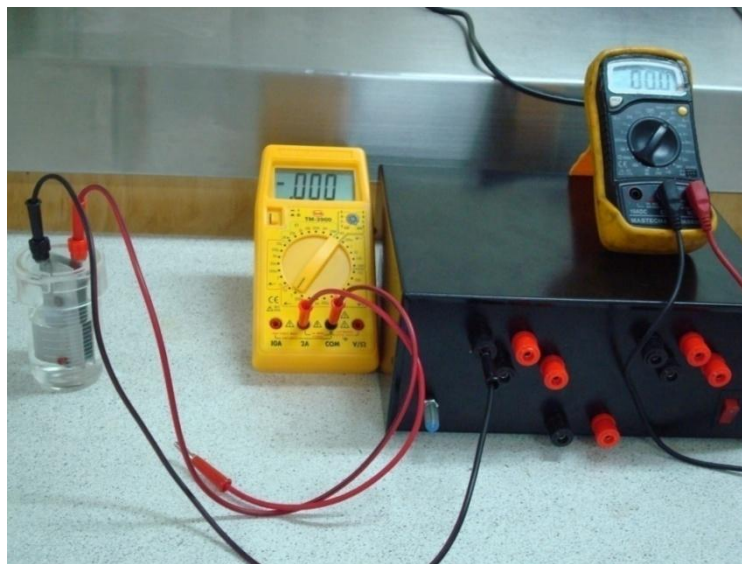


Fuente: Los Autores

### 6.3 FASE III

Durante el desarrollo de esta fase se realizaron todas las pruebas de laboratorio con los crudos sintéticos elaborados, se tomaron lecturas de corriente a estos crudos con concentraciones de sal establecidas previamente, ( 0, 7, 15, 25, 50, 100, 161.4 Lb/1000BBI), posteriormente a estas lecturas de corriente se les sustrajo el valor del crudo base (concentración 0), se usó la ley de OHM para determinar la conductividad de la muestra con la ecuación:  $R = \frac{V}{I}$  y  $\sigma = \frac{1}{R} = \frac{I}{V}$  y se graficaron las concentraciones de sal Vs conductividad, de esta forma se pudieron observar los comportamientos que presentaban las muestras de crudo con diferente contenido de agua. Estos datos fueron utilizados para realizar un análisis completo y tomar las mejores decisiones respecto al tipo de corriente, nivel de corriente, especificaciones finales de la herramienta y correlación definitiva para la determinación del contenido de sal en la muestra de crudo.

Figura 32. Equipo elaborado para la determinación de contenido de sal en crudo.

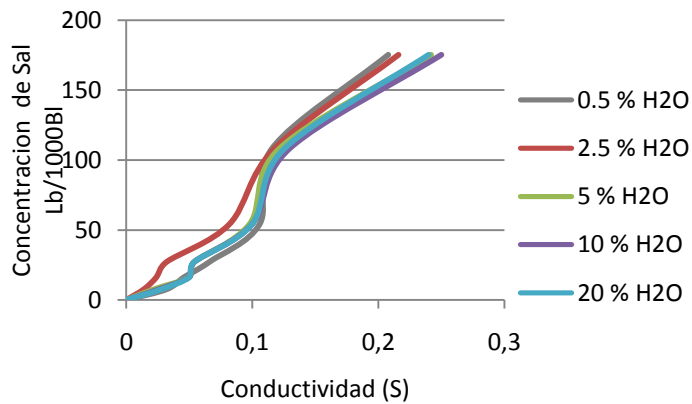


Fuente: Los Autores

## DATOS DE CORRIENTE DIRECTA CON VARIACIONES DEL % DE AGUA

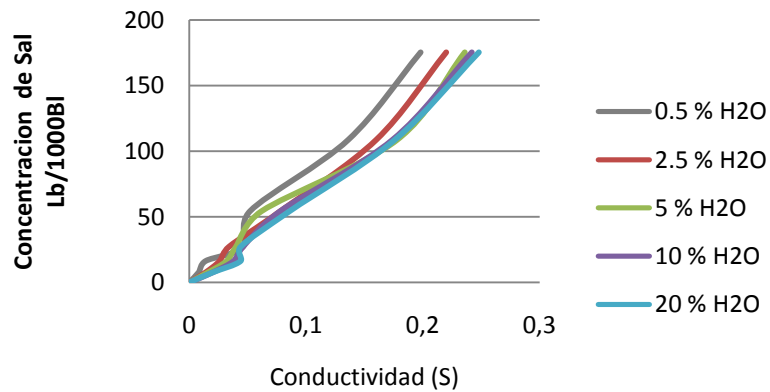
A continuación se presentan las graficas de corriente Vs concentración de sal para diferentes voltajes D.C y su variación respectiva con el porcentaje de agua en las diferentes muestras y el tiempo de reposo al tomar las medidas.

**Figura 33 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 5 VDC con tiempo de 0 min.**



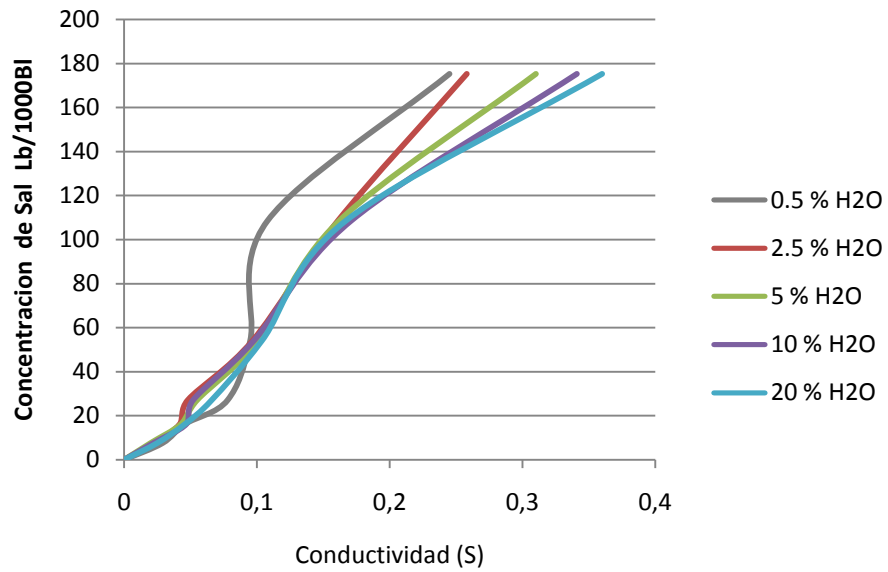
Fuente: Los Autores

**Figura 34 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 5 VDC con tiempo de 5 min.**



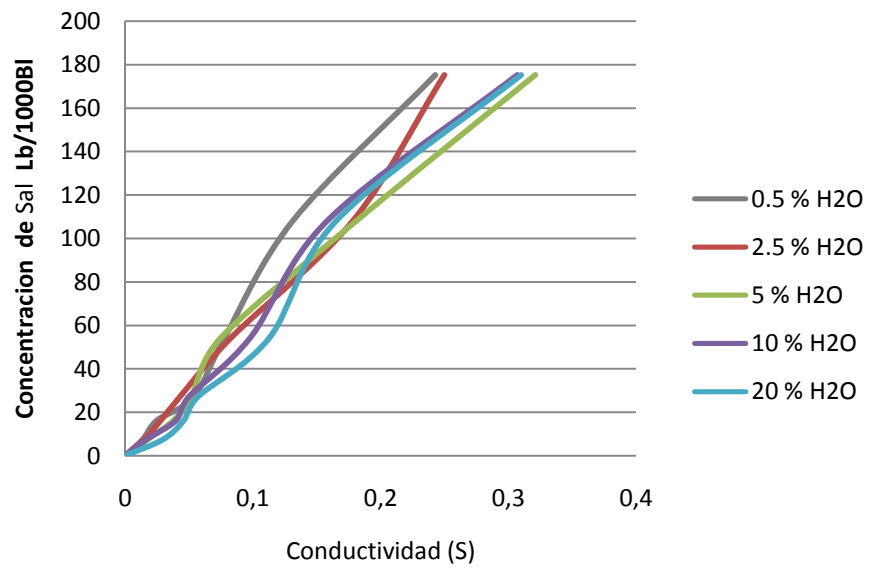
Fuente: Los Autores

Figura 35 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 10 VDC con tiempo de 0 min.



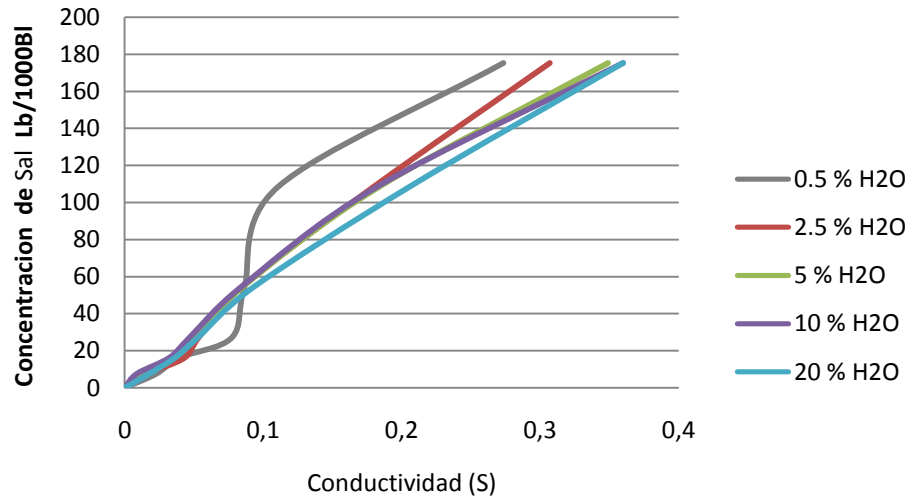
Fuente: Los Autores

Figura 36 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 10 VDC con tiempo de 5 min.



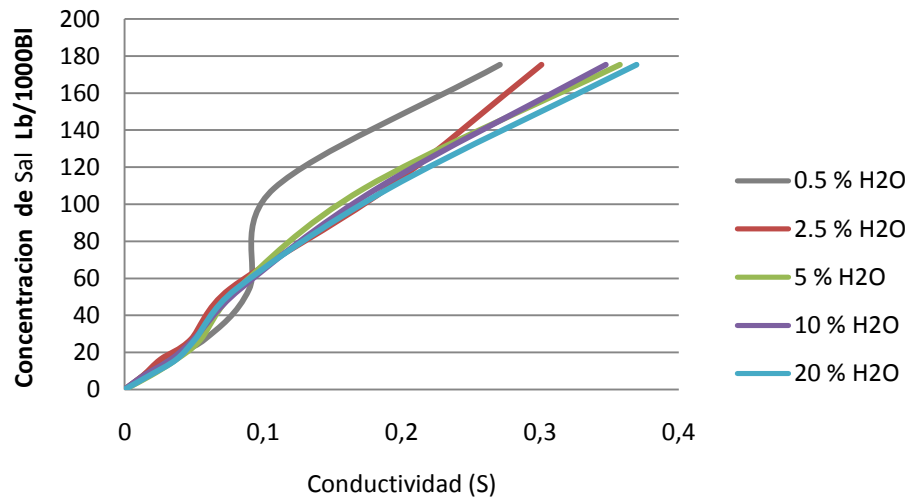
Fuente: Los Autores

**Figura 37 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 20 VDC con tiempo de 0 min.**



Fuente: Los Autores

**Figura 38 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 20 VDC con tiempo de 5 min.**

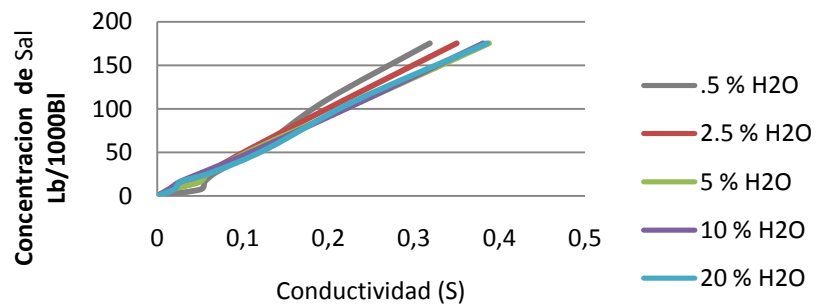


Fuente: Los Autores

## DATOS DE CORRIENTE ALTERNA CON VARIACIONES DEL % DE AGUA

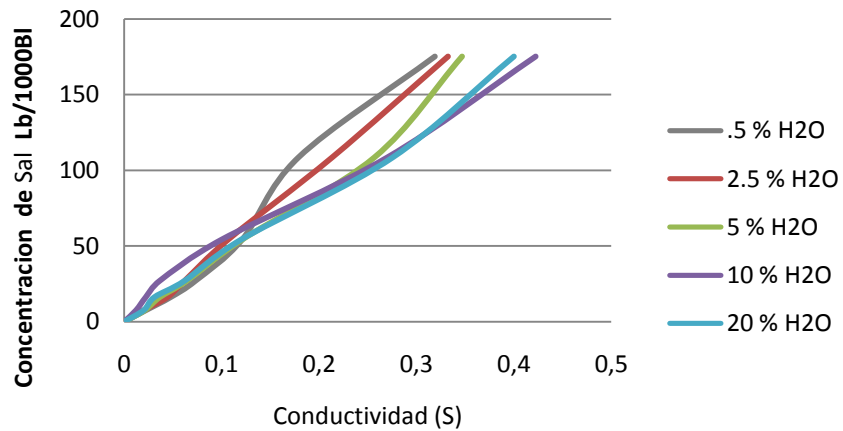
A continuación se presentan las graficas de corriente Vs concentración de sal para diferentes voltajes A.C y su variación respectiva con el porcentaje de agua en las diferentes muestras y el tiempo de reposo al tomar las medidas.

**Figura 39 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 9 VAC con tiempo de 0 min.**



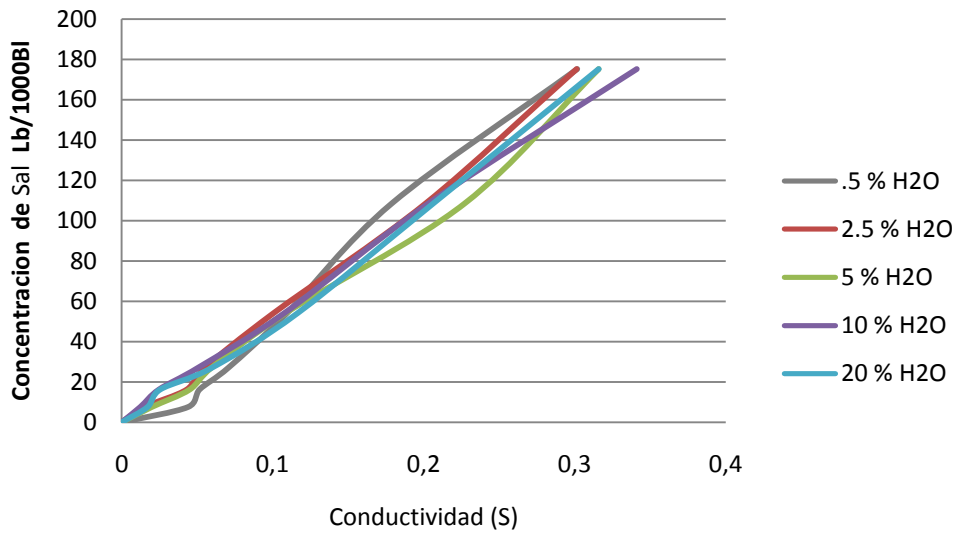
Fuente: Los Autores

**Figura 40 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 9 VAC con tiempo de 5 min.**



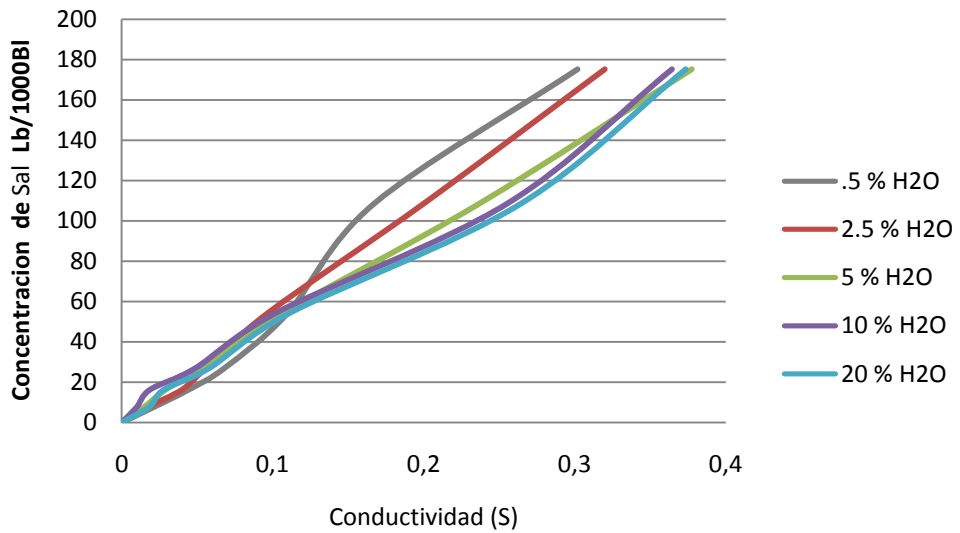
Fuente: Los Autores

Figura 41 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 25 VAC con tiempo de 0 min.



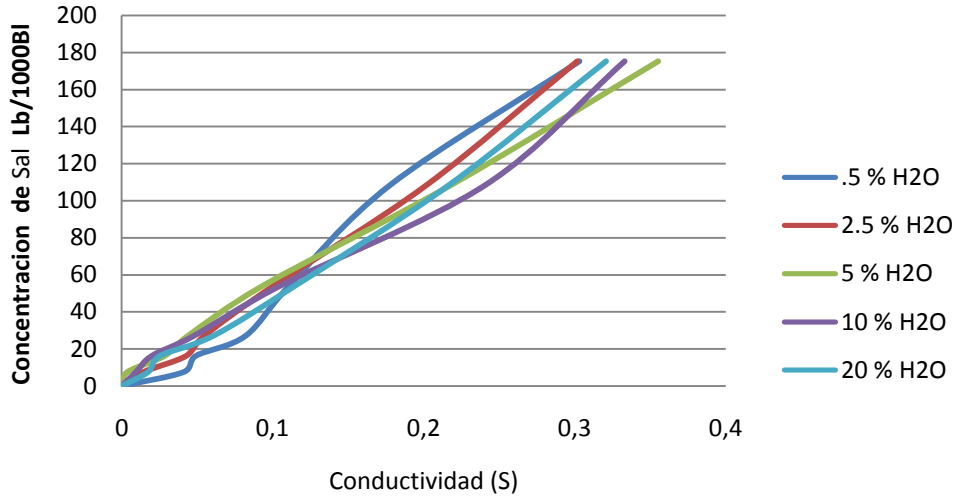
Fuente: Los Autores

Figura 42 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 25 VAC con tiempo de 5 min.



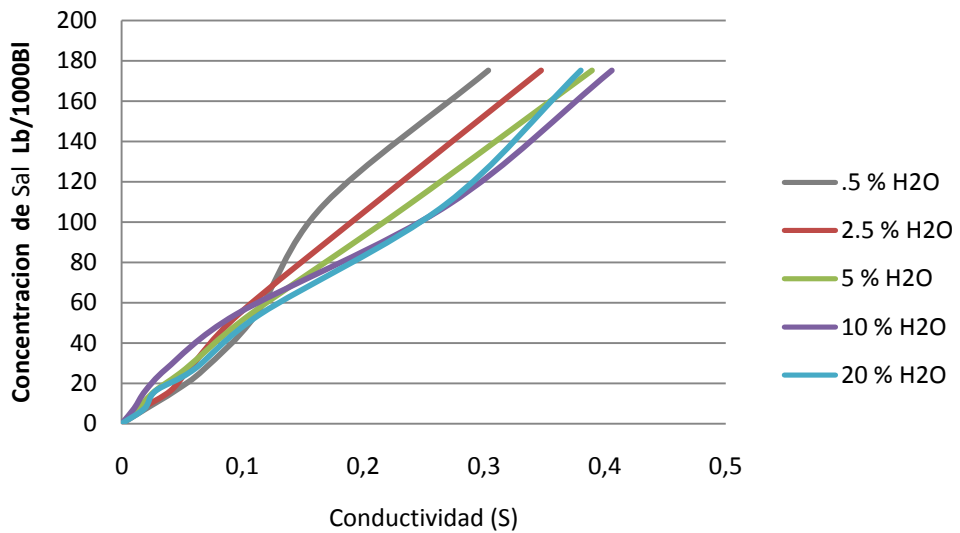
Fuente: Los Autores

Figura 43 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 50 VAC con tiempo de 0 min.



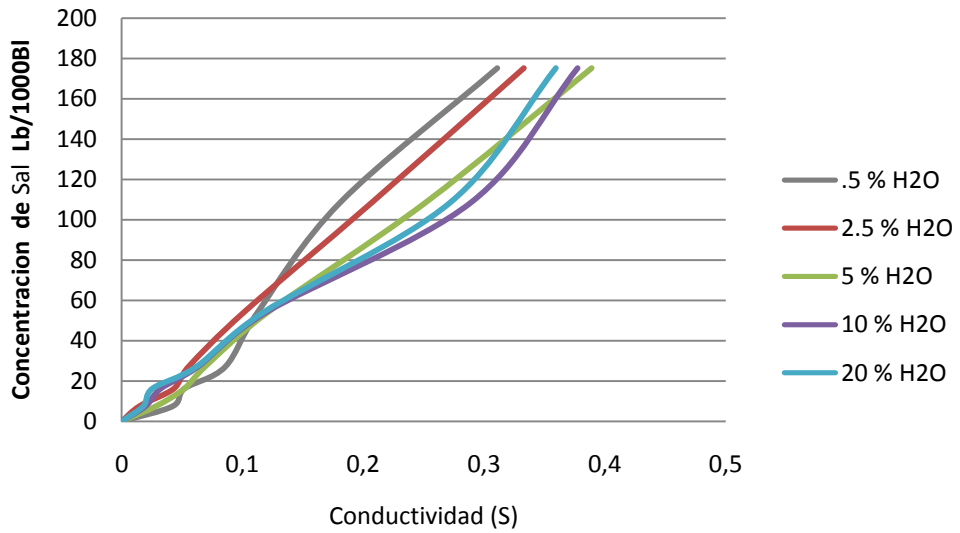
Fuente: Los Autores

Figura 44 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 50 VAC con tiempo de 5 min.



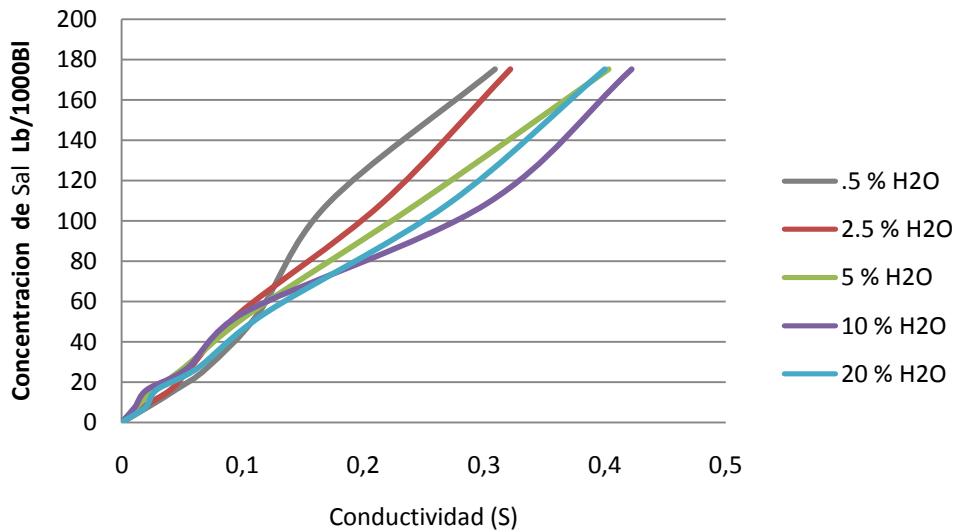
Fuente: Los Autores

**Figura 45 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 120 VAC con tiempo de 0 min.**



Fuente: Los Autores

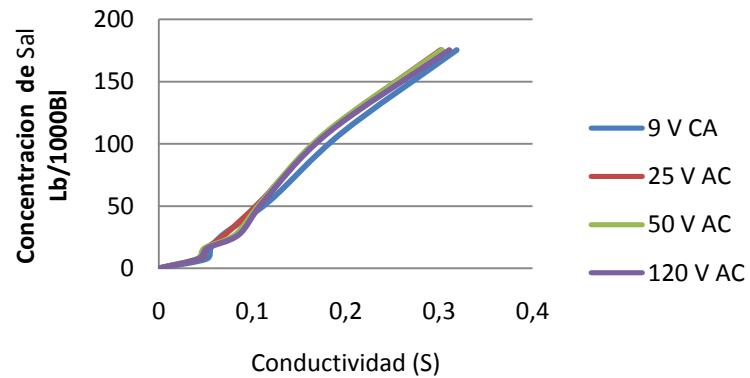
**Figura 46 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 120 VAC con tiempo de 5 min.**



Fuente: Los Autores

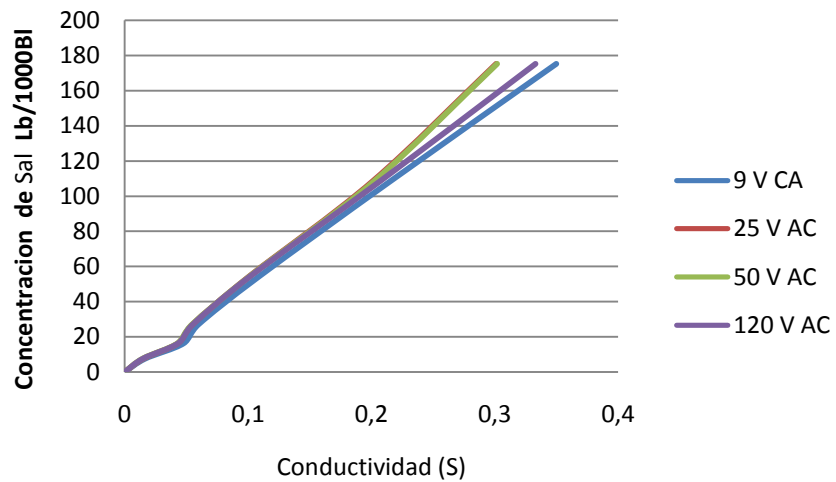
## DATOS DE CONDUCTIVIDAD CON % DE AGUA CONSTANTE Y VARIACIONES DE VOLTAJE DE CORRIENTE ALTERNA

**Figura 47 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 0.5 % de  $H_2O$ .**



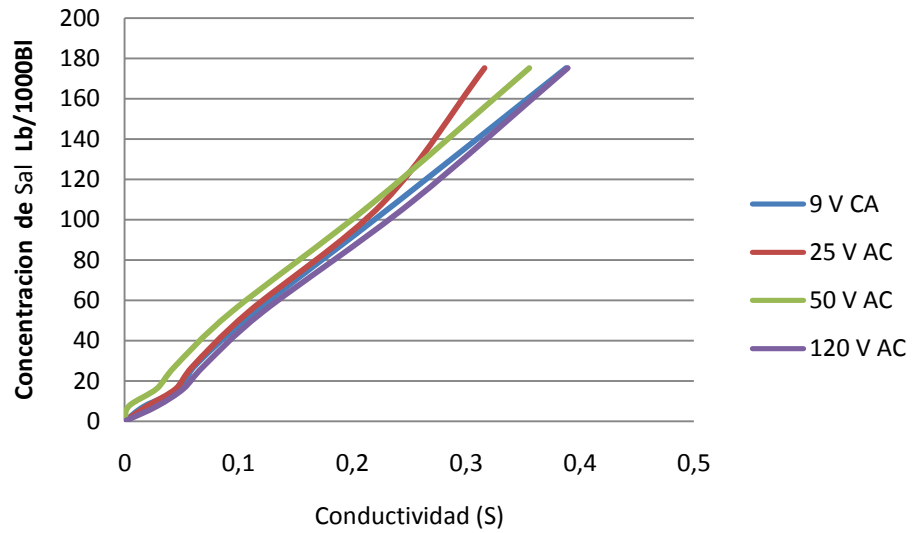
Fuente: Los Autores

**Figura 48 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 2.5 % de  $H_2O$ .**



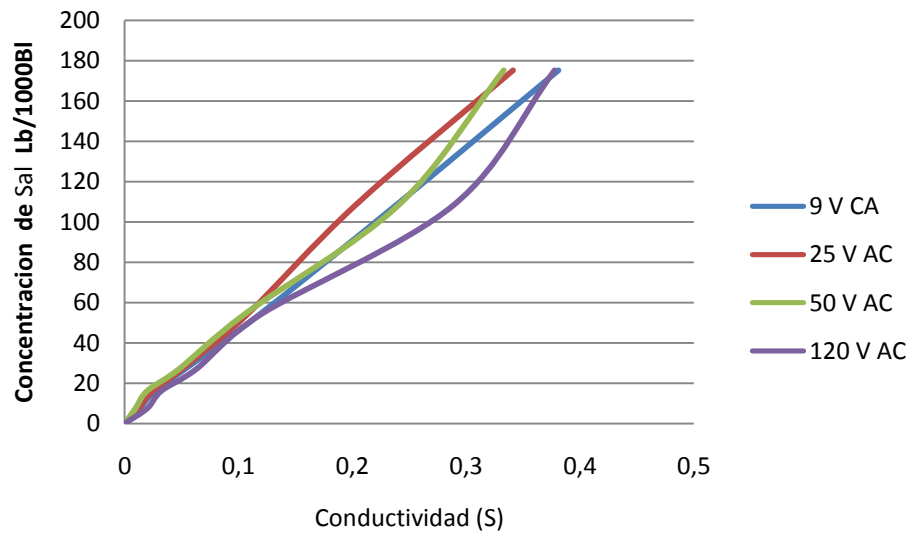
Fuente: Los Autores

Figura 49 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 5 % de  $H_2O$ .



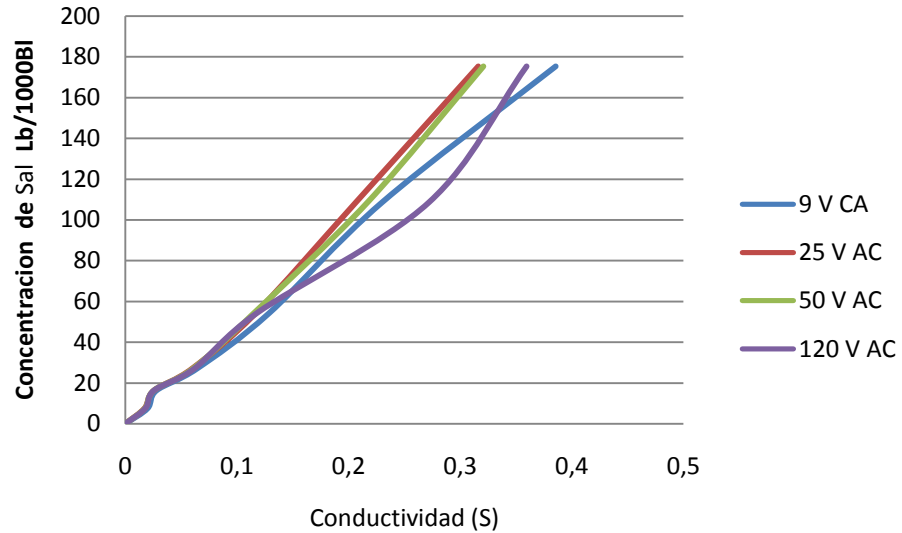
Fuente: Los Autores

Figura 50 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 10 % de  $H_2O$ .



Fuente: Los Autores

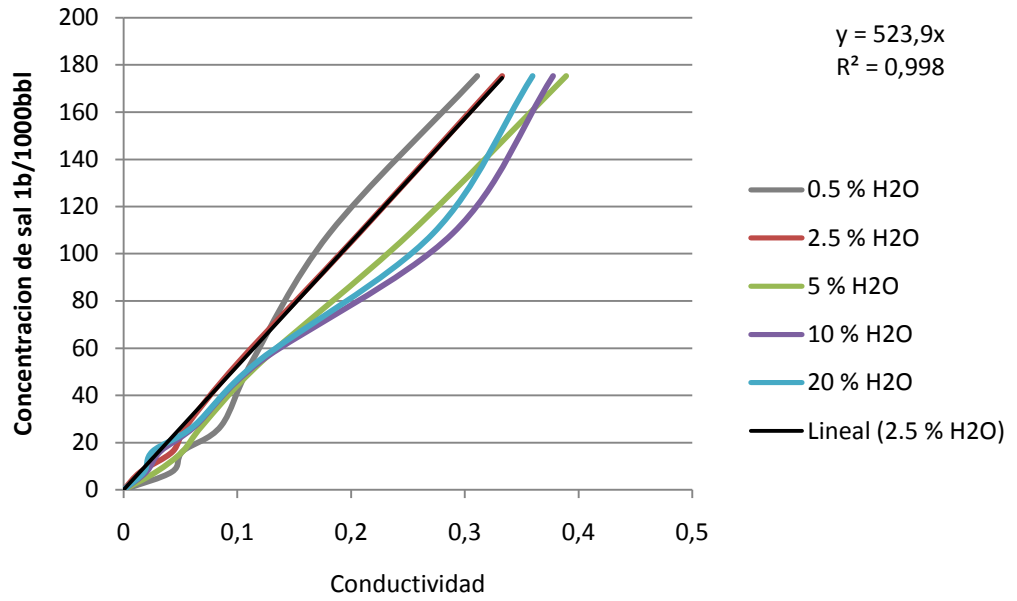
Figura 51 Cantidad de Sal Vs Conductividad para 20 % de  $H_2O$ .



Fuente: Los Autores

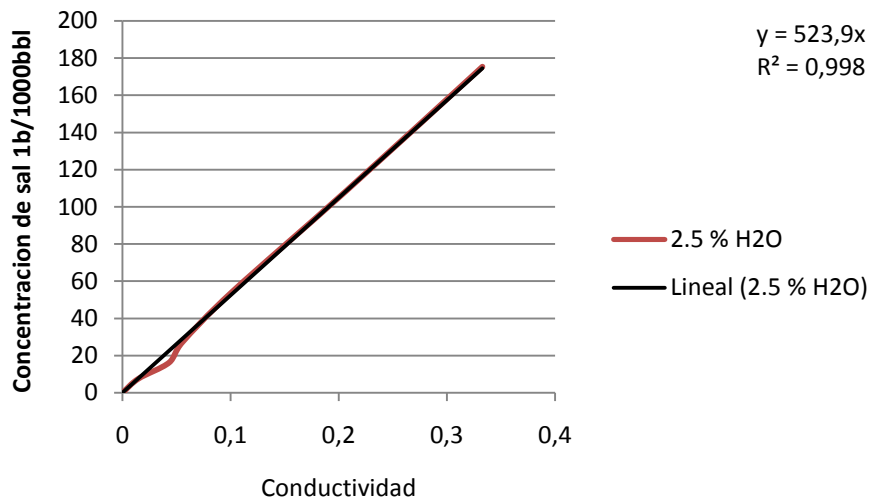
Con base en el análisis de las diferentes graficas de conductividad se realizaron varias observaciones, de las cuales se pudo determinar que los mejores comportamientos se dan con voltajes de corriente alterna y tomando las lecturas de corriente una vez se ha preparado la muestra con sus correspondientes solventes, además se analizaron los diferentes comportamientos con los distintos niveles de voltaje, esto permitió decidir que se usarían 120 V de CA en la herramienta definitiva y se selecciono la línea de 2.5 % de agua como valor medio para crear una línea de tendencia modelo para la correlación definitiva.

**Figura 52 Concentración de Sal Vs conductividad para 120 VAC.**



Fuente: Los Autores

**Figura 53. Línea de Tendencia 120 VAC y 2.5 % de agua**



Fuente: Los Autores

Correlación concentración de sal/conductividad

$$\text{Concentraci3n de sal} = 523.9 \frac{I}{V} = 523.9 \sigma \left( \frac{Lb}{1000BBl} \right) \quad (16)$$

Teniendo como base los resultados obtenidos en las diferentes mediciones de corriente, se realiz3 un an3lisis de varianza y desviaci3n est3ndar con el objetivo de determinar la dispersi3n de los datos respecto al valor medio de las mediciones tomadas a la misma muestra con las especificaciones de la herramienta final; es decir 120 V a.c y 2.5 % de agua reportados en el anexo B.

De acuerdo con lo anterior se aplicaron las ecuaciones (17-19) para tener un estimativo de la precisi3n de los datos de concentraci3n de sal que se obtienen usando esta correlaci3n. Los valores tomados fueron los obtenidos para todas las combinaciones planteadas variando las concentraciones de sal y el porcentaje de agua.

$$\text{Media: } \bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad (17)$$

$$\text{Varianza: } \sigma^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n} \quad (18)$$

$$\text{Desviaci3n Est3ndar: } \sigma = \sqrt{\text{varianza}} \quad (19)$$

Tabla 12. Datos de Desviación Estándar para 0.5 % de agua.

Concentración de Sal (Lb/1000BBL)	0	7	15	25	50	100	161.4
<b>MEDIA</b>	4.2	8.05	10.02	13.6	17.76	25.3	41.4
<b>VARIANZA</b>	0	1.5625	0.1764	0.81	0.001225	0.36	0.01
<b>DESVIACION</b>	0	1.25	0.42	0.9	0.035	0.6	0.1

Fuente: Los Autores

Tabla 13. Datos de Desviación Estándar para 2.5 % de agua.

Concentración de Sal (Lb/1000BBL)	0	7	15	25	50	100	161.4
<b>MEDIA</b>	5.015	6.93	6.935	10.055	11.75	16.93	44.3
<b>VARIANZA</b>	0.0182	2.5 E-05	0.08703	0.0025	0.1332	0.1225	0.64
<b>DESVIACION</b>	0.135	0.005	0.295	0.05	0.365	0.35	0.8

Fuente: Los Autores

Tabla 14. Datos de Desviación Estándar para 5 % de agua.

Concentración de Sal (Lb/1000BBL)	0	7	15	25	50	100	161.4
<b>MEDIA</b>	4.17	6.61	8.91	11.42	17.84	33.95	51.7
<b>VARIANZA</b>	0.9120	0.0016	0.2916	0.00723	0.0049	0.3025	3.24
<b>DESVIACION</b>	0.955	0.04	0.54	0.085	0.07	0.55	1.8

Fuente: Los Autores

Tabla 15. Datos de Desviación Estándar para 10 % de agua.

Concentración de Sal (Lb/1000BBL)	0	7	15	25	50	100	161.4
<b>MEDIA</b>	6.015	7.87	9.23	13.11	19.25	41.5	54
<b>VARIANZA</b>	0.3782	0.0056	0.0042	0.01322	0.3025	1.96	10.89
<b>DESVIACION</b>	0.615	0.075	0.065	0.115	0.55	1.4	3.3

Fuente: Los Autores

Tabla 16. Datos de Desviación Estándar para 20 % de agua.

Concentración de Sal (Lb/1000BBL)	0	7	15	25	50	100	161.4
<b>MEDIA</b>	5.84	8.105	9.12	13.36	20.05	38.4	51.4
<b>VARIANZA</b>	0.0484	0.01323	0	0.0196	0.0225	0.009	4.84
<b>DESVIACION</b>	0.22	0.115	0	0.14	0.15	0.3	2.2

Fuente: Los Autores

Teniendo en cuenta los datos reportados en las tablas 13-17 se deduce que los datos de corriente obtenidos con la herramienta tienden a alejarse en rangos muy mínimos de los valores concretos del promedio, lo cual indica que el método desarrollado es muy preciso reportando datos muy bajos de desviación.

#### PROCEDIMIENTO A UTILIZAR EN LA HERRAMIENTA ELECTROMÉTRICA DESARROLLADA EN ESTE PROYECTO.

En un cilindro graduado de 100 mL agregar 15 mL de varsol (solvente no polar) y agregar 10 mL de la muestra de crudo. Lavar la pipeta con varsol hasta que esté libre de aceite.

Completar hasta 50 mL con varsol, agitar por aproximadamente 60 segundos diluir a 100 mL con Etanol (solvente polar), y agitar de nuevo por 30 seg. Verter inmediatamente dentro de la celda de prueba seca.

Colocar los electrodos en la celda de prueba, asegurándose que el electrodo superior se encuentra bajo la superficie de la solución. Tomar las lecturas de corriente y voltaje visualizadas en la herramienta. Reemplazar los valores leídos en la ecuación 6 y calcular la concentración de sal en lb/1000BBI.

Remover los electrodos de la solución, enjuagar con solvente no polar y dejarlos secar.

#### **6.4 FASE IV**

En el desarrollo de esta fase se trabajaron soluciones salinas con concentraciones de sal previamente establecidas, las mismas concentraciones utilizadas para

elaborar los crudos sintéticos de la fase III. Se realizo titulación y se pudo analizar la exactitud del método Mohr.

**Tabla 17. Datos Método de Mohr.**

<b>Concentración real Lb/1000bbl</b>	<b># gotas</b>	<b>Concentración Mohr Lb/1000bbl</b>	<b>% Error</b>
7	3	9.3	24.8
15	6	18.6	19.4
25	10	31.1	19.4
50	16	49.6	0.74
100	37	114.7	12.8
161.4	45	170.6	5.4

Fuente: Los Autores

## **6.5 FASE FINAL**

En esta fase se utilizaron 4 crudos diferentes de Campo Colorado con sus respectivas °API. Se tomaron los datos correspondientes asociados a la correlación propuesta en la fase III y se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 14.

**Tabla 18. Resultados Comparativos de Método Electrométrico y Método de Mohr.**

<b>Crudo</b>	<b>° API</b>	<b>Conductividad con 120 VAC</b>	<b>Concentración herramienta Lb/1000bbl</b>	<b># got as</b>	<b>Concentración Mohr Lb/1000bbl</b>
Colorado 75	39	0,025	13.37	3	13
Colorado 55	44	0.037	19.37	5	21.6
Laboratorio 1	34.3	0.247	129.7	32	138.6
Laboratorio 4	23.6	0.68	357.5	73	316.27

Fuente: Los Autores

## 7. CONCLUSIONES

- En el desarrollo experimental de este proyecto se tuvieron en cuenta para la elaboración de las emulsiones dos factores los cuales fueron agitación y como agente emulsificante las sales presentes en un yacimiento, se omitió un factor importante como la edad de la emulsión, ya que era muy difícil de replicar. De acuerdo con lo anterior se evidencia que debido a que la emulsión no era muy estable el agua se precipitaba rápidamente en la celda de prueba alterando de esta manera las lecturas de corriente tomadas con la herramienta.
- El uso de diferentes niveles de voltajes en las mediciones de corriente no afecta los resultados si se utiliza la ley de OHM para correlacionar la corriente con el voltaje obteniendo la conductividad y de esta forma determinar la concentración de sal, debido a que el valor de la conductividad va a ser siempre el mismo sin importar la variación de voltaje.
- El uso de corriente directa produce resultados poco precisos debido a la acumulación de algunos componentes del petróleo sobre los electrodos. La acumulación de estos componentes aumenta rápidamente y disminuye la lectura de corriente al igual que la conductividad, esta situación presentada anula la validez de los datos obtenidos en las respectivas mediciones.
- Con base en los resultados obtenidos en la fase final del presente experimento se concluyó que el método electrométrico es más eficiente y preciso en la determinación del contenido de sal en crudos que el método MOHR normalmente utilizado en laboratorio.
- Por los datos recopilados se pudo observar que a los crudos con altos porcentajes de agua es más difícil de determinar su concentración de sal, debido a

una rápida separación de las fases presentes lo cual genera variaciones significativas al momento de hacer la lectura de la corriente en el equipo.

- La determinación de la cantidad de sal presente en el crudo utilizando el método electrométrico es mucho más económica que con el uso del método de MOHR, puesto que solo se genera el costo inicial de la herramienta, mientras que para el uso del método tradicional (MOHR) se debe tener en cuenta el costo del indicador, el agente titulante y los equipos adicionales utilizados en ese procedimiento.

## 8. RECOMENDACIONES

- Con el fin de evitar oscilaciones no deseadas en las lecturas de corriente se recomienda realizar un nuevo estudio donde se utilicen emulsiones reales propias de campo, ya que los crudos sintéticos creados durante este experimento contenían emulsiones débiles las cuales se separaban fácilmente solo con la adición de los solventes, lo cual generaba lecturas muy heterogéneas en los diferentes crudos.
- Se recomienda realizar lecturas con un mayor número de concentraciones de sal ( 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 lb/1000BBI) que permitan generar una correlación más precisa.
- Realizar un nuevo estudio utilizando corriente directa con niveles de voltaje más altos que 20 V para observar su comportamiento y determinar si hay una posible tendencia lineal en los resultados obtenidos.
- Promover el desarrollo de herramientas de medición en el área de laboratorio de fluidos, con el fin de mejorar la calidad de la academia.
- Diseñar y construir un equipo automatizado que trabaje con el mismo principio y pueda ser utilizado para determinar otras propiedades como pH de una mezcla, de manera que sea más práctico y al mismo tiempo pueda ser utilizado en laboratorios de campo.

## BIBLIOGRAFIA

1. **BRICEÑO, Carlos y RODRIGUEZ DE CACERES Lilia.** Química. 2 ed. Bogotá: Fondo Educativo Panamericano, 1999.
2. **COX, D. R, N. Reid.** The Theory of the Design of Experiments. Editorial CHAPMAN & HALL/CRC.
3. **DOUGLAS C. MONTGOMERY.** Design and Analysis of Experiments. Editorial: JOHN WILLEY & SONS; INC 1997.
4. **GIBILISCO, Stan,** Teach Yourself Electricity and Electronics, Editorial McGraw-hill.
5. **J.P HOLMAN** Métodos Experimentales para Ingenieros, editorial McGRAW-HILL México 1997.
6. **LAURIER L. SCHRAMM.** Emulsions. Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. Editorial: American Chemical Society 1992.
7. **L.J. VAN DER PAUW.** A Method Of Measuring The Resistivity And Hall Coefficient On Lamellae Of Arbitrary Shape. Phillis Technical Review. Vol 20.
8. **LOGINOV V.B .** Deshidratación y Desalación de los Crudos 1994.
9. Manual of Petroleum Measurement Standards, 2000.
10. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase 1999.
11. Norma ASTM D3230.
12. **TORSAETER, O and ABTAHI, M.** Experimental Reservoir Engineering Laboratory Workbook. Norwegian University of Science and Technology (2003).

## ANEXOS

## Anexo A. Manual De Uso Herramienta Electrométrica Para Determinar El Contenido De Sal En Crudos.

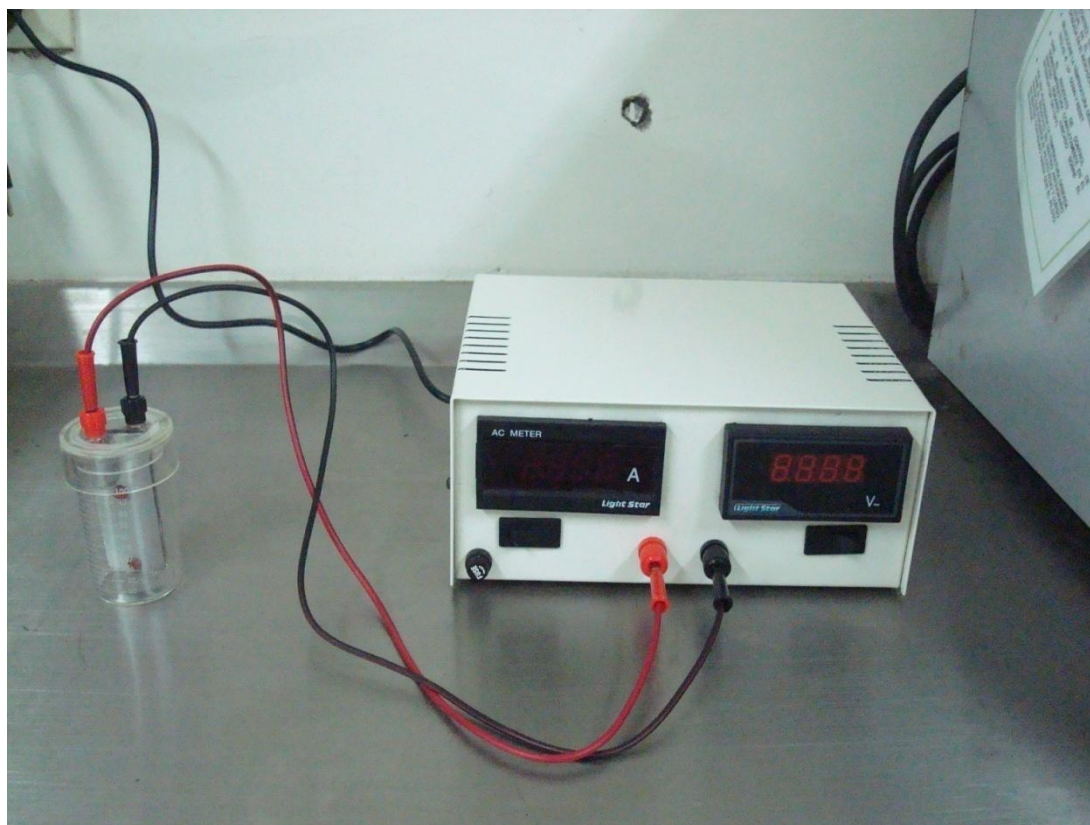
1. Conectar el equipo a un tomacorriente de 110 V CA.
2. Encender el equipo con el switch ubicado en la parte posterior.
3. Verificar las lecturas en cero.
4. Conectar los cables al equipo.
5. En un cilindro graduado de 100 mL agregar 15 mL de varsol (solvente no polar) y agregar 10 mL de la muestra de crudo. Enjuagar la pipeta con varsol hasta que esté libre de aceite.
6. Completar hasta 50 mL con varsol, agitar por aproximadamente 60 segundos diluir a 100 mL con Etanol (solvente polar), y agitar de nuevo por 30 s. Verter inmediatamente dentro de la celda de prueba seca.
7. Conectar los electrodos en la celda de prueba.
8. Oprimir simultáneamente los pulsadores frontales y tomar las lecturas de corriente y voltaje visualizadas en la herramienta.
9. Reemplazar los valores leídos en la ecuación y calcular la concentración de sal en lb/1000BBI:

$$\text{Concentraci3n de sal} = 523.9 \frac{I}{V} = 523.9 \sigma \left( \frac{Lb}{1000BBI} \right)$$

10. Remover los electrodos de la soluci3n, enjuagar con Solvente no polar y dejarlos secar.

11. Apagar el equipo y desconectar.

Herramienta electrométrica desarrollada



Fuente: LOS AUTORES.

**Nota:** En caso de no visualizar ninguna lectura revisar y reemplazar los fusibles del equipo.

## Anexo B. Datos De Corriente.

**Corriente con 5 VDC y 0 minutos.**

<b>VOLTAJE(5 D.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	0,23	0,3	0,4	0,6	0,65	1,11
<b>2.5</b>	0,22	0,27	0,31	0,56	0,74	1,23
<b>5</b>	0,19	0,33	0,35	0,57	0,69	1,29
<b>10</b>	0,2	0,32	0,34	0,57	0,72	1,32
<b>20</b>	0,22	0,33	0,35	0,58	0,71	1,28

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 10 VDC y 0 minutos.**

<b>VOLTAJE(10 D.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	0,56	0,73	1,05	1,22	1,35	2,72
<b>2.5</b>	0,48	0,67	0,73	1,22	1,86	2,83
<b>5</b>	0,46	0,69	0,81	1,27	1,88	3,36
<b>10</b>	0,49	0,74	0,79	1,25	1,98	3,68
<b>20</b>	0,51	0,72	0,92	1,3	1,93	3,86

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 20 VDC y 0 minutos.**

<b>VOLTAJE(20 D.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	1,24	1,57	2,33	2,51	3	6,25
<b>2.5</b>	0,98	1,52	1,72	2,34	4,25	6,79
<b>5</b>	0,99	1,38	1,71	2,38	4,36	7,66
<b>10</b>	0,93	1,4	1,69	2,43	4,4	7,95
<b>20</b>	1,05	1,42	1,75	2,55	4,81	7,89

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 9 VAC y 0 minutos.**

<b>VOLTAJE(9 A.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	0,79	0,83	0,95	1,4	2,09	3,2
<b>2.5</b>	0,55	0,83	0,94	1,38	2,34	3,55
<b>5</b>	0,52	0,81	0,91	1,39	2,51	3,85
<b>10</b>	0,6	0,72	0,96	1,55	2,63	3,91
<b>20</b>	0,62	0,69	1,02	1,6	2,51	3,91

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 25 VAC y 0 minutos.**

<b>VOLTAJE(25 A.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	1,96	2,15	2,63	3,6	5,33	8,4
<b>2.5</b>	1,43	2,13	2,43	3,57	6,08	8,58
<b>5</b>	1,36	1,99	2,35	3,58	6,54	8,76
<b>10</b>	1,56	1,87	2,52	3,95	6,33	9,78
<b>20</b>	1,58	1,79	2,65	4,07	6,31	9,05

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 50 VAC y 0 minutos.**

<b>VOLTAJE(50 A.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	3,8	4,2	5,85	7,3	10,64	16,9
<b>2.5</b>	2,84	4,25	4,85	7,16	12,22	17,2
<b>5</b>	2,72	3,95	4,73	7,22	13,45	20,3
<b>10</b>	3,23	3,75	5,15	8,02	14,8	19,4
<b>20</b>	3,23	3,62	5,39	8,11	13,2	18,39

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 120 VAC y 0 minutos.**

<b>VOLTAJE(120 A.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	9,3	10,44	14,5	17,73	25,9	41,5
<b>2.5</b>	6,94	10,35	11,8	17,33	30	45,1
<b>5</b>	6,65	9,45	11,5	17,77	33,4	49,9
<b>10</b>	7,8	9,29	13	19,8	40,1	50,7
<b>20</b>	8,22	9,12	13,5	20,2	38,7	49,2

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 5 VDC y 5 minutos.**

<b>VOLTAJE(5 D.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	0,21	0,24	0,4	0,43	0,85	1,16
<b>2.5</b>	0,18	0,24	0,28	0,5	0,91	1,21
<b>5</b>	0,17	0,25	0,29	0,4	0,98	1,27
<b>10</b>	0,18	0,27	0,31	0,47	0,95	1,29
<b>20</b>	0,19	0,31	0,31	0,52	0,97	1,33

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 10 VDC y 5 minutos**

<b>VOLTAJE(10 D.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	0,48	0,59	0,88	1,12	1,66	2,77
<b>2.5</b>	0,45	0,58	0,73	1,13	2,09	2,8
<b>5</b>	0,41	0,61	0,75	0,98	2,05	3,44
<b>10</b>	0,46	0,69	0,79	1,27	1,88	3,36
<b>20</b>	0,56	0,72	0,83	1,39	1,92	3,36

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 20 VDC y 5 minutos.**

<b>VOLTAJE(20 D.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	1,01	1,3	1,9	2,54	2,9	6,16
<b>2.5</b>	0,95	1,2	1,64	2,2	4,47	6,7
<b>5</b>	0,97	1,34	1,69	2,22	4,05	7,74
<b>10</b>	0,99	1,38	1,71	2,38	4,36	7,66
<b>20</b>	1,09	1,48	1,75	2,34	4,55	8,12

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 9 VAC y 5 minutos**

<b>VOLTAJE(9 A.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	0,53	0,76	0,99	1,42	1,94	3,2
<b>2.5</b>	0,56	0,78	0,94	1,34	2,3	3,37
<b>5</b>	0,52	0,66	0,91	1,42	2,64	3,45
<b>10</b>	0,61	0,7	0,83	1,4	2,93	4,3
<b>20</b>	0,6	0,7	0,98	1,5	2,9	4,02

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 25 VAC y 5 minutos.**

<b>VOLTAJE(25 A.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	1,38	1,96	2,56	3,6	5,03	8,4
<b>2.5</b>	1,42	2	2,4	3,42	6	9
<b>5</b>	1,35	1,71	2,34	3,65	6,9	10,42
<b>10</b>	1,57	1,79	2,55	3,87	7,7	10,43
<b>20</b>	1,54	1,79	2,55	3,87	7,7	10,43

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 50 VAC y 5 minutos.**

<b>VOLTAJE(50 A.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	2,76	3,94	5,15	7,3	10,09	16,9
<b>2.5</b>	2,85	4,02	4,8	6,84	12,4	19,36
<b>5</b>	2,71	3,42	4,67	7,36	13,9	21,5
<b>10</b>	3,23	3,69	4,55	7,45	16,23	23
<b>20</b>	3,15	3,61	5,22	7,93	15,58	21,2

Fuente: Los Autores.

**Corriente con 120 VAC y 5 minutos.**

<b>VOLTAJE(120 A.C)</b>						
Concentración sal (Lb/1000Bl) % Agua	7	15	25	50	100	161.4
<b>0.5</b>	6,8	9,6	12,7	17,8	24,7	41,3
<b>2.5</b>	6,93	9,76	11,7	16,6	30,7	43,5
<b>5</b>	6,57	8,37	11,3	17,91	34,5	53,5
<b>10</b>	7,95	9,16	13,2	18,7	42,9	57,3
<b>20</b>	7,99	9,12	13,2	19,9	38,1	53,6

Fuente: Los Autores.