

**UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA DISMINUCIÓN  
DE CARGA ORGÁNICA CON UN SISTEMA  
FOTOVOLTAICO EN UN PROCESO DE  
ELECTROCOAGULACIÓN DEL LACTOSUERO RESIDUAL  
DISTRITO DE APATA- JUNIN**

**PRESENTADA POR EL BACHILLER**

**Harold Roberto, GONZALES SANTIVÁÑEZ.**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL  
HUANCAYO-PERÚ**

**2015**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA DISMINUCIÓN  
DE CARGA ORGÁNICA CON UN SISTEMA  
FOTOVOLTAICO EN UN PROCESO DE  
ELECTROCOAGULACIÓN DEL LACTOSUERO  
RESIDUAL- DISTRITO DE APATA**

## DEDICATORIA

*Este trabajo se lo dedico primero al Señor de los Milagros y a María Auxiliadora, ya que gracias a ellos me concedieron la gran dicha de tener a unos padres tan buenos como los tengo.*

*Se lo dedico a mi papá, por sus consejos, su apoyo incondicional en estos años de formación universitaria, por siempre guiarme y nunca perder la fe en mí.*

*A mi mamá, por estar siempre a mi lado a pesar de todas las dificultades que puedan ocurrir, por ser siempre tan comprensiva.*

*A mi hermano por ser mi ejemplo de persona y de profesional, por siempre aconsejarme y querer lo mejor para mí.*

## **AGRADECIMIENTO**

A *Dios* por haberme permitido llegar hasta este punto, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte durante todo el periodo de estudio.

A la universidad Alas Peruanas que me dio la bienvenida, como tal las oportunidades que me ha brindado son incomparables, y antes de todo esto pensaba que fuera posible algún día si quiera me topara con una de ellas. .

Al Ing. Jose Valer, coordinador de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Alas Peruanas-Filial Huancayo, por su apoyo desinteresado en el transcurso de los años universitarios y la agilización del presente trabajo.

A los miembros del Jurado de esta tesis Magister Orlando Vilca e Ing. Edgar Quijada por sus buenas sugerencias y propuestas, que contribuyeron al mejoramiento y ordenamiento del presente trabajo.

A mis padres y hermano, por ser ellos el pilar central en mi vida, porque sin sus esfuerzos, trabajo y apoyo constate, no lo habría logrado.

A mi amiga Cinthia por su apoyo incondicional y desinteresado en los años de universidad y en la elaboración del presente trabajo.

Con mucha sinceridad, mi agradecimiento a todos los que hice mención ya que con su aporte hicieron posible esta presentación.

## INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
INDICE DE CONTENIDOS .....	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS. ....	viii
INDICE DE TABLAS .....	x
INDICE DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	xvii
CAPÍTULO I .....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Caracterización de la Realidad Problemática. ....	1
1.2. Formulación del Problema .....	4
1.2.1. Problema General .....	4
1.2.2. Problemas Específicos .....	4
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	5
1.4. Justificación .....	5
1.5. Importancia .....	6
1.6. Limitaciones .....	8
CAPÍTULO II .....	9

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	9
2.1. Marco Referencial .....	9
2.1.1. Antecedentes de la Investigación .....	9
2.1.2. Referencias Históricas.....	16
2.2. Marco Legal .....	20
2.3. Marco Conceptual.....	24
2.4. Marco Teórico.....	27
2.4.1. Las fuentes de energía de las que abastecemos .....	27
2.4.2. Energía solar fotovoltaica.....	31
2.4.3. Clasificación de instalaciones solares fotovoltaicas .....	38
2.4.4. Aguas residuales .....	45
2.4.5. Estándares de Calidad Ambiental .....	62
CAPÍTULO III .....	70
3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	70
3.1. Metodología .....	70
3.1.1. Armado del panel solar.....	70
3.1.2. Diseño y construcción de la celda de electrocoagulación .....	72
3.1.3. Pruebas Experimentales .....	76
3.1.4. Tipo de la Investigación.....	80
3.1.5. Nivel de la Investigación.....	80
3.2. Diseño de la Investigación.....	80
3.3. Hipótesis de la Investigación.....	81
3.3.1. Hipótesis General.....	81
3.3.2. Hipótesis Específicas .....	81

3.4. Variables .....	82
3.4.1. Variable Independiente.....	82
3.4.2. Variable Dependiente .....	82
3.5. Cobertura del Estudio. ....	82
3.5.1. Universo. ....	82
3.5.2. Población.....	82
3.5.3. Muestra. ....	82
3.5.4. Muestreo. ....	82
3.6. Técnicas e Instrumentos .....	83
3.6.1. Técnicas de la Investigación. ....	83
3.6.2. Instrumentos de la Investigación. ....	83
3.7. Procesamiento estadístico de la información.....	83
3.7.1. Estadísticos. ....	83
3.7.2. Representación. ....	83
3.7.3. Técnica de comprobación de la hipótesis.....	83
CAPITULO IV.....	84
4. ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	84
4.1. Resultados.....	84
4.2. Discusión de Resultados.....	91
CONCLUSIONES. ....	103
RECOMENDACIONES .....	104
BIBLIOGRAFÍA .....	105
ANEXOS.....	111

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS.

ANA:	Autoridad Nacional del Agua.
MINAM:	Ministerio del Ambiente.
MINAGRI:	Ministerio de Agricultura.
ECA:	Estándar de Calidad Ambiental.
LMP:	Límite Máximo Permisible.
DBO5:	Demanda bioquímica de oxígeno total.
DQO:	Demanda química de oxígeno total.
G y A:	Grasas y Aceites.
SDT:	Sólidos Disueltos Totales.
SS:	Sólidos Suspendidos.
SST:	Sólidos Suspendidos Totales.
ST:	Sólidos Totales.
EC:	Electrocoagulación.
EF:	Electroflotación.
EO:	Electrooxidación.
ED:	Electrodialisis.
V:	Voltaje.
A:	Amperaje.
Kwh :	kilo watt por hora.
AT&T: '	The Bell Solar Battery.
DC:	Energía eléctrica.
CA:	Corriente alterna.
FV =	Fotovoltaico.
CC:	Corriente Continua.
MWp :	Megavatio pico.
CIS:	Seleniuro de cobre e indio.
w:	Cantidad de metal disuelto.
I:	Cantidad empleada en el proceso.



t:	Tiempo de tratamiento.
M:	Masa molar de metal.
n:	Numero de electrodos intercambiados en el proceso de oxidación.
F:	Constante de Faraday.
j:	Densidad de corriente.
S:	Conductores y sus sección.
U:	Tensión.
I:	Intensidad de corriente.
W/m <sup>2</sup> :	Vatios por metro cuadrado.
kg/m <sup>2</sup> :	Kilogramos por metro cuadrado.
kWh/día:	Kilo vatios hora por día.
mg/L:	Miligramos por litro.
K:	Potasio.
Ca:	Calcio.
Mg:	Magnesio.
Zn:	Zinc.
Fe:	Hierro.
Cu:	Cobre.
Fe(OH) <sub>2</sub> :	Hidróxido ferroso.
Fe(OH) <sub>3</sub> :	Hidróxido férrico.
mg/l O <sub>2</sub> :	Oxígeno diatómico por litro.

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. <i>Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Agua</i> .....	22
Tabla 2.2. Bebida de animales.....	23
Tabla 2.3. Energías renovables y no renovables .....	28
Tabla 2.4. Procedimientos para generar electricidad .....	29
Tabla 2.5. Aplicaciones de la energía eléctrica generada a través de módulos fotovoltaicos. ....	33
Tabla 2.6. Clasificación y rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas en función de su potencia .....	40
Tabla 2.7. Origen y principales características de los lactosueros de la Elaboración de Quesos.....	48
Tabla 2.8. Composición promedio de los lactosueros dulces y ácidos derivados de la elaboración de quesos.....	49
Tabla 2.9. ECAS Nacionales.....	64
Tabla 2.10. A nivel internacional los Estándares de calidad ambiental.....	64
Tabla 3.1. Diseño factorial codificada y real.....	81
Tabla 4.1. Resultados de remoción de DQO a 1cm de distancia de electrodos ...	84
Tabla 4.2. Resultados de remoción de DQO a 1cm de distancia de electrodos - Replica .....	85
Tabla 4.3. Resultados de remoción de DQO a 3 cm de distancia de electrodos ...	86
Tabla 4.4. Resultados de remoción de DQO a 3 cm de distancia de electrodos - Replica .....	86
Tabla 4.5. Resultados de remoción de DQO a 6 cm de distancia de electrodos ..	87
Tabla 4.6. Resultados de remoción de DQO a 6 cm de distancia - Replica.....	88
Tabla 4.7.,. Resultados Promedio de Remoción 1 cm de distancia de electrodos y % de Remoción de DQO .....	89
Tabla 4.8. Resultados Promedio de Remoción 1 cm de distancia de electrodos y % de Remoción de DQO .....	89
Tabla 4.9. Resultados Promedio de Remoción 1 cm de distancia de electrodos y % de Remoción de DQO .....	90

Tabla 4.10 Arreglo interno del Panel Fotovoltaico.....	92
Tabla 4.11 Consumo Energético Estimado.....	93
Tabla 4.12 Características del Lactosuero Acido .....	96

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. <i>Accionar energético.</i> .....	32
Figura 2.2. Principales símbolos utilizados en los esquemas .....	38
Figura 2.3. Conexiones exteriores de paneles fotovoltaicos .....	38
Figura 2.4. Dos ejemplos de instalación fotovoltaica aislada .....	39
Figura 2.5. Atlas solar del Perú .....	45
Figura 2.6. Esquema general de un proceso electroquímico. ....	50
Figura 2.7. Proceso en un reactor de electrocoagulación. ....	55
Figura 2.8. Reactores para electrocoagulación tipo batch: .....	60
Figura 2.9. Reactor tipo filtro prensa .....	60
Figura 2.10. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo .....	61
Figura 2.11. Reactor de lecho fluidizado .....	62
<i>Figura 3.1. Montaje del panel solar</i> .....	72
Figura 3.2. Celda de electrocoagulación .....	74
Figura 3.3. Dimensiones de la celda de electrocoagulación .....	74
Figura 3.4. Colocación de electrodos de fierro y aluminio. ....	74
Figura 3.5. Electrodos de sacrificio. ....	75
Figura 3.6. Diagrama de equipo de electrocoagulación .....	76
Figura 3.7. Equipo de electrocoagulación. ....	76
Figura 3.8. Lactosuero inicial .....	78
Figura 3.9. A 2.5 voltios. ....	78
Figura 3.10. A 5 voltios .....	79
Figura 3.11. A 10 voltios .....	79
Figura 3.12. Extracción de lodos. ....	79
Figura 3.13. Efluente final .....	79
Figura 4.1. Reducción de DQO con 1 cm de separación de electrodos .....	85
Figura 4.2. Reducción de DQO con 3 cm de separación de electrodos .....	87
Figura 4.3. Reducción de DQO con 6 cm de separación de electrodos .....	88

Figura 4.4. % de Remocion de DQO Vs Disstancia de Separacion de Electrodo	
Electrodos .....	90
Figura 4.5. pH Vs Voltaje .....	91
Figura 4.6 Relación de DQO con el Voltaje .....	97
Figura 4.7 Relación de DQO con la Distancia de Separación de Electrodo	98
Figura 4.8 Interval Plot of 1 cm; 3 cm y 6cm .....	100
Figura 4.9 Interval Plot of 2,5 V; 5 V y 10V .....	102

## RESUMEN

El lactosuero residual no solamente constituye un problema ambiental; también constituye un recurso que no se puede dejar de aprovechar. El desafío consiste en una explotación más eficaz y en una reducción del impacto ambiental, lo que implica optimizar los procesos de producción del queso. El objetivo de la investigación fue principalmente determinar la eficiencia de la variación del voltaje y separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.

El método identificado fue la electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y hierro en una celda electrolítica. Los resultados obtenidos de la experimentación en un reactor piloto de 1,5 litros, ha permitido demostrar que el método utilizado resulta ser muy efectivo en el proceso de electrocoagulación del lactosuero residual para la eliminación de contaminantes. El uso del panel fotovoltaico hace que este tratamiento sea más económico y genere un ahorro de energía notable.

Los iones necesarios para la coagulación en un proceso químico son aportados por los electrodos tales como  $Al^{+3}$  y  $Fe^{+3}$  que provocan el efecto deseado de la coalescencia de las partículas, con ayuda de la electrólisis del agua que desprende hidrógeno y oxígeno.

Al caracterizar el lactosuero residual se puede observar la presencia de: pH 4,4, sólidos totales 52,14 mg/L, calcio 139,5 mg/L, fosfatos 224,18 mg/L, cloruros 90,7 mg/L DQO 1725,5 mg/L, DBO 1252,4 mg/L.

Se logró la separación del DQO del lactosuero residual por el método de electrocoagulación; siendo 1 cm la distancia óptima entre electrodos, 10 voltios a un tiempo de 3 horas. Después del proceso de electrocoagulación es posible utilizar el agua en diferentes procesos, evitando la contaminación ambiental.

**Palabras clave:** Lactosuero ácido, electroquímica, electrocoagulación, electrodos.

## ABSTRACT

This paper titled "Removal of Hexavalent Chromium by chemical precipitation with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{BaCl}_2$  Industrial Wastewater Used in the SCRL Tannery Regional Center" has as main objective to evaluate determine the percentage of removal of chromium VI variation of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{BaCl}_2$  in certain mixing times for chemical precipitation process in aqueous solution; 36 for which experimental tests with three different dosages of the two flocculants and variation three stirring time was performed.

The percentage of removal of chromium VI with the  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  flocculant in different times of 15 min, 30 min and 45 min, at doses of 0,36 g resulting 47,1% were determined; 72,4% and 71,5% removal of Cr (VI), respectively, for a dose of 0.60 g resulting 72.4%; 85.9% and 82.8% removal of Cr (VI) respectively and a dose of 1,15 g resulting 87,5%; 91,7% and 90,2% removal of Cr (VI), similarly with the flocculant  $\text{BaCl}_2$  at different times of 15 min, 30 min and 45 min, the resulting dosage of 0,36 g 59,0 %; 85,6% and 86,9% removal of Cr (VI) respectively, for a dose of 0,60 g resulting 83,6%; 90,1% and 89,9% removal of Cr (VI) respectively and a dose of 1,15 g resulting 94,4%; 96,5% and 93,5% removal of Cr (VI).

The highest % removal of hexavalent chromium was determined in 30 minutes in each of the flocculants and were compared to dosing at 1,15 g respectively,  $\text{BaCl}_2$  in the acid solution has the highest removal percentage being 96,50%.

The stirring time relationship with the removal of chromium with the flocculant  $\text{BaCl}_2$  linear form obtaining an equation  $Y = -0,0182 * X + 1,096$  with correlation coefficient of 0,9656, the kinetics are also analyzed in terms obtaining first-order reaction rate constant (K), with a value of  $0,028 \text{ min}^{-1}$  and a correlation coefficient of  $R^2 = 0,9796$ . Likewise with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  linearly flocculant will obtain an equation  $Y = -0,0353 * X + 2,398$  a correlation coefficient of 0,9579, the kinetics are also

analyzed in terms of first-order reaction obtaining kinetic constant (K), with a value of  $0,0232 \text{ min}^{-1}$  and a correlation coefficient of  $R^2 = 0,9539$ . With these results it was determined that flocculants  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{BaCl}_2$  have high percentages of removal of hexavalent chromium.



## INTRODUCCIÓN

La industria láctea genera gran cantidad de aguas residuales, concentrando en estas la mayor cantidad de contaminantes originados en sus procesos. Las aguas residuales de la industria láctea se caracterizan por poseer una gran cantidad de materia orgánica, especialmente grasas y aceites, además de sólidos suspendidos y valores de pH que se salen de los rangos aceptables para vertimiento.

El objetivo del presente proyecto de investigación es determinar la eficiencia de la variación del voltaje y separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual del distrito de Apata-Junín. Así como se propone determinar el efecto de la variación del voltaje en la disminución de la carga orgánica y determinar el efecto de la variación de la separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.

La electrocoagulación es un proceso que se ha venido desarrollando en los últimos años y que se presenta como alternativa de tratamiento para las aguas residuales de esta industria, ofreciendo múltiples ventajas comparativas con las tecnologías tradicionales.

La energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos dispositivos denominados paneles fotovoltaicos. En los paneles fotovoltaicos, la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando una pequeña diferencia de potencial. La conexión en serie de estos dispositivos permite obtener diferencias de potencial mayores. Esta forma de energía alternativa tiene una tendencia a ser una de las principales fuentes de energía que predominarán en el futuro. La eficiencia de los sistemas fotovoltaicos va en aumento y conforme avance el desarrollo, los costos tenderán a la baja, lo que permitirá la producción y el uso a gran escala.

Estos procesos son muy conocidos en el mundo pero poco utilizados en nuestro país y en nuestra región por tal razón el motivo de este trabajo de investigación para la evaluación de la eficiencia de la disminución de carga orgánica con un sistema fotovoltaico en un proceso de electrocoagulación del lactosuero residual-distrato de Apata, siendo una tecnología limpia, sostenible y responsable para mantener el equilibrio del medio ambiente la calidad del recurso hídrico para ser aprovechado en distintas actividades, recuperar la calidad de los suelos agrícolas y mejorar la calidad de vida de las personas.

## **CAPÍTULO I**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. Caracterización de la Realidad Problemática.**

El agua es imprescindible para que exista la vida, no solo porque es parte de la composición de su estructura molecular, sino también por la innumerable cantidad de procesos y reacciones químicas, biológicas y físicas en las que participa.

Para el ser humano, no solo está el rol de dar y mantener vida, sino que también es utilizada en muchos otros procesos, que se adentran más en una índole social, productiva o industrial. Los recursos naturales se han vuelto escasos con la creciente población mundial y su disposición en varias regiones habitadas es la preocupación de muchas organizaciones gubernamentales. (Fair Gordon Maskew, 1994)

El agua es un recurso de vital importancia en la vida del hombre por lo que su conservación debe ser uno de los principales objetivos. En la mayoría de los países desarrollados se tratan las aguas residuales en un porcentaje elevado. Hoy en día existen una serie de tecnologías emergentes que están basadas en la electroquímica y que actualmente se presentan como

alternativas que ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales.

Se puede mencionar en este grupo la electrocoagulación que es una técnica utilizada para el tratamiento de diversas aguas residuales. En este proceso son removidos los contaminantes que se encuentran suspendidos, emulsionados o disueltos en el medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales. (Cristancho, 2010)

Efluentes líquidos de diferentes procesos industriales han sido tratados mediante electrocoagulación, obteniendo resultados alentadores en la remoción de contaminantes hecho que ha despertado el interés de la industria láctea por investigar e implementar esta tecnología en el tratamiento de sus aguas residuales y particularmente para el tratamiento de los residuos de quesería (suero lácteo).

A nivel nacional en las centrales lecheras se producen diariamente una considerable cantidad de aguas residuales, suelen oscilar entre 4 y 10 L de agua por cada litro de leche tratada, según el tipo de planta. De la producción de queso se obtiene como residuo el lactosuero, suero de quesería o suero lácteo. El lactosuero es definido como la sustancia líquida obtenida por separación del coágulo de leche en la elaboración de queso. (MarcadorDePosición1)

El lactosuero que se libera, corresponde a cerca del 83 % del volumen de leche utilizada como materia prima. La descarga de éstos sin tratamiento previo se convierte en un foco contaminante si no se tiene un aprovechamiento posterior, ya que contiene gran cantidad de lactosa y proteínas.

La energía es indispensable para el desarrollo de nuestra vida. En nuestro planeta la mayor parte de nuestra energía está basada en el petróleo, el carbón y el gas natural. El uso de estos combustibles ha contribuido a generar dos situaciones desfavorables. Primero, el problema del aumento

de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero que influyen en el cambio climático. Segundo, la creciente demanda de energía por el aumento poblacional viene acompañada con la disminución en las reservas de petróleo (Alatorre Frenck, 2009).

Ante estas situaciones se han generado búsquedas de fuentes alternativas de energía como la energía solar, la eólica y la geotérmica.

La energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos dispositivos denominados paneles fotovoltaicos. En los paneles fotovoltaicos, la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando una pequeña diferencia de potencial. La conexión en serie de estos dispositivos permite obtener diferencias de potencial mayores.

Aunque el efecto fotovoltaico era conocido desde el siglo XIX, fue en la década de los 50, en plena carrera espacial, cuando los paneles fotovoltaicos comenzaron a experimentar un importante desarrollo. Inicialmente utilizados para suministrar electricidad a satélites geoestacionarios de comunicaciones, hoy en día constituyen una tecnología de generación eléctrica renovable.

Esta forma de energía alternativa tiene una tendencia a ser una de las principales fuentes de energía que predominarán en el futuro. La eficiencia de los sistemas fotovoltaicos va en aumento y conforme avanza el desarrollo, los costos tenderán a la baja, lo que permitirá la producción y el uso a gran escala.

A nivel provincial, es preocupación los desechos del lactosuero ácido vertido en el distrito de Apata, provincia de Jauja, ya que el lactosuero ácido principalmente contiene alto contenido de materia orgánica, unas 10-12 veces más que el que puede estar presente como promedio en un residuo acuoso por ello es aconsejable que estos sueros no sean vertidos de forma directa, pues provocan un enorme incremento de la DQO, DQO y SS; provocando un serio problema ambiental.

## **1.2. Formulación del Problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuál es la eficiencia de la variación del voltaje y separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento lactosuero residual?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuáles serán las características fisicoquímicas que presenta el lactosuero de la elaboración de productos lácteos en el distrito de Apata?
- ¿Cuál será el efecto de la variación del voltaje en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual?
- ¿Cuál será el efecto de la variación de la separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual?
- ¿Cuál será la eficiencia de la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinar la eficiencia de la variación del voltaje y separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Determinar las características fisicoquímicas que presenta el lactosuero de la elaboración de productos lácteos en el distrito de Apata del año 2015.
- Determinar el efecto de la variación del voltaje en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.
- Determinar el efecto de la variación de la separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.
- Calcular la eficiencia de la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.

### **1.4. Justificación**

Las aguas residuales de la industria láctea es uno de los contaminantes de agua de gran impacto en el medio ambiente. Las sustancias químicas que contienen dichas aguas provenientes de su producción están relacionadas con la presencia alta concentración de carga orgánica.

La descarga de estas aguas residuales al medio ambiente puede provocar un serio peligro para los seres humanos y las diferentes formas de vida acuática debido a su naturaleza toxica.

Este trabajo se centra en la disminución de carga orgánica del lactosuero residual mediante un proceso de electrocoagulación lo cual resulta un método factible, rápido, sencillo, y medianamente económico debido a que también se utilizara energía solar mediante un panel fotovoltaico en cual no consume combustible, pues obtiene su energía del Sol, lo cual significa que, económicamente, en el largo plazo estos sistemas son más viables y

estables. El generar energía térmica sin que exista un proceso de combustión, desde el punto de vista medioambiental, es un procedimiento muy favorable por ser limpio y no producir contaminación.

La investigación se realiza con el objeto disminuir la contaminación, lo cual mejorara significativamente la calidad del recurso hídrico para ser aprovechado en distintas actividades, mantener el equilibrio del medio ambiente y mejorar la calidad de vida de las personas.

### **1.5. Importancia**

La importancia de la investigación se realiza teniendo en cuenta los problemas de aguas contaminadas con residuos de la industria láctea, que provocan impactos negativos al ambiente y por consiguiente, a la salud humana., siendo el lactosuero uno de los principales problemas de contaminación por su alta concentración de fósforo. Debido a la urgente necesidad de preservar el recurso hídrico, en esta investigación, se utilizó el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales generadas por la industria láctea con lo que se busca la reducción de los contaminantes como la DBO, DQO y SST de estas aguas residuales lo cual es muy importante para ayudar a erradicar el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida de la población.

Para ello, se requiere de estrategias inmediatas para el abastecimiento y tratamiento de los efluentes de agua residuales. Lo que se conseguirá con la aplicación del proceso de electrocoagulación que mediante la utilización de ánodos y cátodos se forman reacciones de oxidación que atacaran a los contaminantes y disminuirán la concentración de materia orgánica en el agua, para de esta manera contribuir con la minimización y descontaminación del agua por las industrias lácteas.

Con este trabajo se ha buscado recopilar la información más relevante y de actualidad que se tiene acerca de la aplicabilidad de la técnica de electrocoagulación en la remoción de agentes contaminantes en



disoluciones acuosas, así como la potencialidad de ser aplicada en la reducción de las elevadísimas cargas orgánicas que presenta el suero derivado de la industria láctea en la elaboración de quesos. Se hace una revisión de la electrocoagulación, discutiendo los retos y oportunidades de esta tecnología, presentando su potencial de aplicación, además de sus ventajas y, finalmente, se plantean los mecanismos de reacción, el diseño y operación de los reactores. Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico. Así cuando el también denominado lactosuero no es aprovechado económicamente y se convierte en un residuo acuoso y vertido a los canales de aguas residuales, se magnifica el impacto ambiental por el incremento de DQO. Aplicar nuevas técnicas de reducción de las cargas orgánicas con elevadas eficiencias en este tipo de residuos, es un reto de actualidad.

La Transformación de energía solar en energía térmica o eléctrica puede realizarse en el propio lugar de consumo, sin tener que transportarse ni depender de otras infraestructuras.

La energía del sol es un recurso de uso universal; por lo tanto, no se debe pagar por utilizar esta energía. Sin embargo, es importante recordar que para realizar la transformación de energía solar en energía eléctrica se necesita de un sistema fotovoltaico apropiado. La utilización de energía solar con tecnología fotovoltaica, convierte la energía solar en energía eléctrica con celdas fotoeléctricas, hechas principalmente de silicio que reacciona con la luz.

La energía solar térmica es una de las aplicaciones prácticas con más futuro dentro del marco urbano para reducir la emisión de gases contaminantes y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Los materiales, el diseño y la instalación son los costos de un sistema solar, ya

que no requiere ningún combustible para su funcionamiento y los costos de mantenimiento son muy bajos, a diferencia de los sistemas convencionales de calentamiento.

#### **1.6. Limitaciones**

- Las cantidades de potencia y energía que se pueden obtener de un sistema fotovoltaico están limitadas por la capacidad de generación y almacenamiento de los equipos instalados, especialmente de los módulos y la batería respectivamente, y por la disponibilidad del recurso solar.
- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.

## **CAPÍTULO II**

### **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.1. Marco Referencial**

##### **2.1.1. Antecedentes de la Investigación**

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE DEPURACIÓN POR ELECTROCOAGULACIÓN EN UN LACTOSUERO – MEXICO, REALIZADO POR CALLEJAS HERNÁNDEZ, PRIETO GARCÍA, REYES CRUZ, BUSTOS BUSTOS & MARMOLEJO SANTILLÁN, 2012: Efluentes líquidos han sido tratados mediante electrocoagulación (EC), obteniendo resultados alentadores en remoción de contaminantes. El objetivo ha sido estudiar la aplicación de la EC para el tratamiento del lactosuero ácido, con reducción de carga orgánica. Se analizó en lactosuero valores de pH, pZ, punto isoeléctrico y DQO. Se usó un reactor electroquímico tipo batch de 2 L y se realizó un estudio volta y cronopotenciométrico para obtener condiciones de potencial y corriente empleando 3 electrodos soportados sobre placa de teflón y separación 10 mm; aluminio y hierro como ánodos, grafito y óxido de rutenio/titanio como cátodos y un electrodo de referencia.

En y durante la EC se evaluó la cinética considerando como respuesta el mayor porcentaje de remoción de la DQO o porcentaje de eficiencia y variación del pH y pZ. Se concluye que el mejor arreglo de electrodos fue el del par Al-OxRut. Se obtuvo una variación del pH y pZ como resultado de reacciones anódicas y catódicas; las principales variaciones se producen con los arreglos Fe-OxRut y Al-OxRut. En las primeras 8 horas el pH incrementó de 4,82 a 8,67 y a 6,56 para las especies de Fe y Al. Entre las primeras 10 y 12 h de la EC se alcanza la máxima variación significativa así como la mayor remoción de la DQO por formación de coloides y emulsiones de oxihidróxidos de hierro y/o aluminio en los que se reincorporan por oclusión, las macromoléculas orgánicas. Las mayores remociones de DQO fueron con los pares Al-OxRut y Al-Graf, que presentaron un 83 % y 66 %, respectivamente a las 10 h. Para los arreglos de hierro no se llegó a alcanzar el 50 % de eficiencia.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE TRATAMIENTO DE SUERO DE QUESERÍA POR MÉTODO ELECTROQUÍMICO – PERU, REALIZADO POR ZÁRATE MALPICA, ANCHIRAICO COSQUILLO, S. LAGOS & BUSTAMANTE CÁRDENAS, 2011: El suero de quesería no solamente constituye un problema ambiental; también constituye un recurso que no se puede dejar de aprovechar. El desafío consiste en una explotación más eficaz y en una reducción del impacto ambiental, lo que implica optimizar los procesos de producción del queso. El objetivo de la investigación fue principalmente separar los compuestos orgánicos utilizando un método electroquímico.

El método identificado fue la electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y fierro en una celda electrolítica. Los

resultados obtenidos de la experimentación en un reactor piloto de 2,5 litros, ha permitido demostrar que el método utilizado resulta ser muy efectivo en el proceso de electrocoagulación del suero de quesería para la eliminación de contaminantes. Los iones necesarios para la coagulación en un proceso químico son aportados por los electrodos tales como  $Al^{+3}$  y  $Fe^{+3}$  que provocan el efecto deseado de la coalescencia de las partículas, con ayuda de la electrólisis del agua que desprende hidrógeno y oxígeno.

Al caracterizar el suero se puede observar la presencia de: 556 mg/l de SS, 36,651 mg/l DBO, 80,140 mg/l DQO, 267 mg/l P y 1,070 mg/l de aceites y grasas. Se logró la separación de la materia orgánica del suero de quesería por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio; siendo 2 cm la distancia óptima entre electrodos, 6 voltios a un tiempo de 10 minutos para DBO5, DQO y aceites y grasas. Después del proceso de electrocoagulación es posible utilizar el agua en procesos industriales en la planta, evitando la contaminación ambiental.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE DISEÑO DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA – COLOMBIA, REALIZADO POR ARANGO RUIZ. & GARCÉS GIRALDO, 2007: El sistema de electrocoagulación juega un papel muy importante en la efectividad de remoción de contaminantes. Algunos aspectos de diseño a tener en cuenta están relacionados con la celda, los electrodos, los materiales de este, la geometría y la disposición de los electrodos son fundamentales para que la aplicación de la electrocoagulación tenga resultados óptimos. La investigación permitió establecer la geometría tanto de la celda como de los

electrodos, materiales y tipo de conexión, adicionalmente determinar los parámetros eléctricos de la fuente de voltaje.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE LA INDUSTRIA DE LA LECHE Y LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA – MEXICO, REALIZADO POR VALENCIA DENICIA, & RAMÍREZ CASTILLO, 2009: Los autores de este trabajo presenta una alternativa para el del tratamiento de las aguas residuales que perjudican el ambiente acuático y, en general, a los seres vivos, antes de que lleguen a los suelos, ríos, lagos y posteriormente a los mares.

El tratamiento fue una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que se clasificaron en: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y terciario.

El pretratamiento consistió en separar sólidos gruesos que pueden provocar taponamiento; el tratamiento primario separa las partículas en suspensión que no son retenidas por el pretratamiento; en el tratamiento secundario o biológico se utilizaron microorganismos que eliminan materia orgánica disuelta; por último, en el tratamiento terciario se adicionan compuestos químicos para su desinfección. La alta capacidad contaminante del suero de leche, con una DBO que varía entre 30,000 a 50,000 mg/l, además de la cantidad de ácido láctico presente en él, va a alterar significativamente los procesos biológicos que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento aumentando los costos. Para el tratamiento de suero lácteo, se aplicaron tratamientos biológicos antes de que sea vertido a los suelos y ríos, es por ello que se plantean procesos convencionales y no convencionales.

Las aguas residuales de la industria de los lácteos son una fuente de contaminación importante, es por ello que se debe llevar a cabo su tratamiento. Se han desarrollado tecnologías alternativas para la

reutilización del lactosuero en la elaboración de productos alimenticios con resultados exitosos. Debemos tomar en cuenta que la ciencia y la tecnología no sólo afectan al ambiente, también tienen el compromiso de restaurarlo y conservarlo, en este caso desarrollando nuevos productos en beneficio de la sociedad.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE DEPURACIÓN POR ELECTROCOAGULACIÓN EN UN LACTOSUERO – MEXICO, REALIZADO POR CALLEJAS HERNÁNDEZ, PRIETO GARCÍA, REYES CRUZ, BUSTOS BUSTOS & MARMOLEJO SANTILLÁN, 2012: Efluentes líquidos han sido tratados mediante electrocoagulación (EC), obteniendo resultados alentadores en remoción de contaminantes. El objetivo ha sido estudiar la aplicación de la EC para el tratamiento del lactosuero ácido, con reducción de carga orgánica. Se analizó en lactosuero valores de pH, pZ, punto isoelectrico y DQO. Se usó un reactor electroquímico tipo batch de 2 L y se realizó un estudio volta y cronopotenciométrico para obtener condiciones de potencial y corriente empleando 3 electrodos soportados sobre placa de teflón y separación 10 mm; aluminio y hierro como ánodos, grafito y óxido de rutenio/titanio como cátodos y un electrodo de referencia.

En y durante la EC se evaluó la cinética considerando como respuesta el mayor porcentaje de remoción de la DQO o porcentaje de eficiencia y variación del pH y pZ. Se concluye que el mejor arreglo de electrodos fue el del par Al-OxRut. Se obtuvo una variación del pH y pZ como resultado de reacciones anódicas y catódicas; las principales variaciones se producen con los arreglos Fe-OxRut y Al-OxRut. En las primeras 8 horas el pH incrementó de 4,82 a 8,67 y a 6,56 para las especies de Fe y Al. Entre las primeras 10 y 12 h de la EC se alcanza la máxima variación

significativa así como la mayor remoción de la DQO por formación de coloides y emulsiones de oxihidróxidos de hierro y/o aluminio en los que se reincorporan por oclusión, las macromoléculas orgánicas. Las mayores remociones de DQO fueron con los pares Al-OxRut y Al-Graf, que presentaron un 83 % y 66 %, respectivamente a las 10 h. Para los arreglos de hierro no se llegó a alcanzar el 50 % de eficiencia.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE TRATAMIENTO DE SUERO DE QUESERÍA POR MÉTODO ELECTROQUÍMICO – PERU, REALIZADO POR ZÁRATE MALPICA, ANCHIRAICO COSQUILLO, S. LAGOS & BUSTAMANTE CÁRDENAS, 2011: El suero de quesería no solamente constituye un problema ambiental; también constituye un recurso que no se puede dejar de aprovechar. El desafío consiste en una explotación más eficaz y en una reducción del impacto ambiental, lo que implica optimizar los procesos de producción del queso. El objetivo de la investigación fue principalmente separar los compuestos orgánicos utilizando un método electroquímico.

El método identificado fue la electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y fierro en una celda electrolítica. Los resultados obtenidos de la experimentación en un reactor piloto de 2,5 litros, ha permitido demostrar que el método utilizado resulta ser muy efectivo en el proceso de electrocoagulación del suero de quesería para la eliminación de contaminantes. Los iones necesarios para la coagulación en un proceso químico son aportados por los electrodos tales como  $Al^{+3}$  y  $Fe^{+3}$  que provocan el efecto deseado de la coalescencia de las partículas, con ayuda de la electrólisis del agua que desprende hidrógeno y oxígeno.



Al caracterizar el suero se puede observar la presencia de: 556 mg/l de SS, 36,651 mg/l DBO, 80,140 mg/l DQO, 267 mg/l P y 1,070 mg/l de aceites y grasas. Se logró la separación de de la materia orgánica del suero de quesería por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio; siendo 2 cm la distancia óptima entre electrodos, 6 voltios a un tiempo de 10 minutos para DBO5, DQO y aceites y grasas. Después del proceso de electrocoagulación es posible utilizar el agua en procesos industriales en la planta, evitando la contaminación ambiental.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE DISEÑO DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA – COLOMBIA, REALIZADO POR ARANGO RUIZ. & GARCÉS GIRALDO, 2007: El sistema de electrocoagulación juega un papel muy importante en la efectividad de remoción de contaminantes. Algunos aspectos de diseño a tener en cuenta están relacionados con la celda, los electrodos, los materiales de este, la geometría y la disposición de los electrodos son fundamentales para que la aplicación de la electrocoagulación tenga resultados óptimos. La investigación permitió establecer la geometría tanto de la celda como de los electrodos, materiales y tipo de conexión, adicionalmente determinar los parámetros eléctricos de la fuente de voltaje.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE LA INDUSTRIA DE LA LECHE Y LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA – MEXICO, REALIZADO POR VALENCIA DENICIA, & RAMÍREZ CASTILLO, 2009: Los autores de este trabajo presenta una alternativa para el del tratamiento de las aguas residuales que perjudican el ambiente

acuático y, en general, a los seres vivos, antes de que lleguen a los suelos, ríos, lagos y posteriormente a los mares.

El tratamiento fue una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que se clasificaron en: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y terciario.

El pretratamiento consistió en separar sólidos gruesos que pueden provocar taponamiento; el tratamiento primario separa las partículas en suspensión que no son retenidas por el pretratamiento; en el tratamiento secundario o biológico se utilizaron microorganismos que eliminan materia orgánica disuelta; por último, en el tratamiento terciario se adicionan compuestos químicos para su desinfección. La alta capacidad contaminante del suero de leche, con una DBO que varía entre 30,000 a 50,000 mg/l, además de la cantidad de ácido láctico presente en él, va a alterar significativamente los procesos biológicos que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento aumentando los costos. Para el tratamiento de suero lácteo, se aplicaron tratamientos biológicos antes de que sea vertido a los suelos y ríos, es por ello que se plantean procesos convencionales y no convencionales.

Las aguas residuales de la industria de los lácteos son una fuente de contaminación importante, es por ello que se debe llevar a cabo su tratamiento. Se han desarrollado tecnologías alternativas para la reutilización del lactosuero en la elaboración de productos alimenticios con resultados exitosos. Debemos tomar en cuenta que la ciencia y la tecnología no sólo afectan al ambiente, también tienen el compromiso de restaurarlo y conservarlo, en este caso desarrollando nuevos productos en beneficio de la sociedad.

### **2.1.2. Referencias Históricas.**

En realidad el ensayo de la DBO solo apareció en el año de 1912 en el octavo reporte de la “Royal Commision on Sewage Disposar”,

(Umaña, 2012) es decir, apenas en esta época se empezó a entender la naturaleza de la remoción del oxígeno de las masas de agua por la acción de la remoción de oxígeno de los compuestos biodegradables presentes en las aguas contaminadas. En el año de 192 H.Y. Clarke de la Estación Experimental de Lawrence estaba ensayando la remoción de DBO mediante la insuflación de aire a las aguas contaminadas. (Griselda Galindo, 2005) El Dr. Fowler de la Corporación de Manchester observo estos experimentos y se los sugirió a Edwar Arden y Willian Lockett de la dicha Corporación, quienes descubrieron los lodos activados. (J. Glynn Henry, 1996) Aquí ocurrieron unos de los casos más interesantes de serendipity<sup>6</sup> en la historia de la ingeniería. Arden y Lockett efectuaban sus experimentos en diversos recipientes, con muy poco éxito, (Metcalf, 1998) como que solo obtenían reducciones de DBO del orden del 10% con 24 horas de oxigenación, quedando al final del experimento unos "loditos" que se sedimentaban en el fondo. (Torrecillas, 2003)

Los estudios que hacen referencia al tratamiento de las aguas residuales con contenido de lactosuero o a efluentes de la industria láctea se han encaminado hacia la búsqueda de alternativas que permitan mitigar el impacto ambiental de estos vertimientos sobre los cuerpos de agua. (Jaramillo, 2005) Es por esto que en los últimos años, (Alvarez Contretas, 2006) ha habido un interés creciente en el tratamiento de efluentes industriales por métodos electroquímicos como una alternativa a los tratamientos biológicos tradicionales (gil, 2004; Torrecillas, 2003), y a otros métodos que tienen como inconveniente el costo de los equipos y el costo de operación. (Xavier Domenech, 2006)

A nivel internacional, investigaciones llevadas a cabo por Orhon et al., (1993), indican que las aguas residuales producidas por la

industria láctea son ricas en materiales orgánicos y fácilmente degradables en forma biológica. (Ramalho, 2003) Existen diversos sistemas utilizados para tratar este tipo de aguas residuales, entre los que destacan los siguientes: el uso de reactores UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket), el proceso SBR (del inglés Secuencial Batch Reactor) y los tratamientos biológicos como las Lagunas de Estabilización (LE) y los humedales artificiales, (Lapeña, 1990) Nasr y El-Kamah (1996) llevaron a cabo estudios sobre las técnicas de tratamiento común de las aguas residuales de la industria láctea y Danalewich et al., (1998) sobre sus características. (Rodríguez, 2006) En cuanto al uso de sistemas lagunares para el tratamiento de aguas residuales lácteas se encontró el trabajo de Sukias et al., (2001) donde evaluaron el desempeño de lagunas de estabilización facultativas a escala completa de una granja lechera en Nueva Zelanda. (Eduardo Ronzano, 2002).

En realidad el ensayo de la DBO solo apareció en el año de 1912 en el octavo reporte de la “Royal Commision on Sewage Disposar”, (Umaña, 2012) es decir, apenas en esta época se empezó a entender la naturaleza de la remoción del oxígeno de las masas de agua por la acción de la remoción de oxígeno de los compuestos biodegradables presentes en las aguas contaminadas. En el año de 192 H.Y. Clarke de la Estación Experimental de Lawrence estaba ensayando la remoción de DBO mediante la insuflación de aire a las aguas contaminadas. (Griselda Galindo, 2005) El Dr. Fowler de la Corporación de Manchester observo estos experimentos y se los sugirió a Edwar Arden y Willian Lockett de la dicha Corporación, quienes descubrieron los lodos activados. (J. Glynn Henry, 1996)Aquí ocurrieron unos de los casos más interesantes de serendipity<sup>6</sup> en la historia de la ingeniería. Arden y Lockett

efectuaban sus experimentos en diversos recipientes, con muy poco éxito, (Metcalf, 1998) como que solo obtenían reducciones de DBO del orden del 10% con 24 horas de oxigenación, quedando al final del experimento unos "loditos" que se sedimentaban en el fondo. (Torrecillas, 2003)

Los estudios que hacen referencia al tratamiento de las aguas residuales con contenido de lactosuero o a efluentes de la industria láctea se han encaminado hacia la búsqueda de alternativas que permitan mitigar el impacto ambiental de estos vertimientos sobre los cuerpos de agua. (Jaramillo, 2005) Es por esto que en los últimos años, (Alvarez Contretas, 2006) ha habido un interés creciente en el tratamiento de efluentes industriales por métodos electroquímicos como una alternativa a los tratamientos biológicos tradicionales (gil, 2004; Torrecillas, 2003), y a otros métodos que tienen como inconveniente el costo de los equipos y el costo de operación. (Xavier Domenech, 2006)

A nivel internacional, investigaciones llevadas a cabo por Orhon et al., (1993), indican que las aguas residuales producidas por la industria láctea son ricas en materiales orgánicos y fácilmente degradables en forma biológica. (Ramalho, 2003) Existen diversos sistemas utilizados para tratar este tipo de aguas residuales, entre los que destacan los siguientes: el uso de reactores UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket), el proceso SBR (del inglés Secuencial Batch Reactor) y los tratamientos biológicos como las Lagunas de Estabilización (LE) y los humedales artificiales, (Lapeña, 1990) Nasr y El-Kamah (1996) llevaron a cabo estudios sobre las técnicas de tratamiento común de las aguas residuales de la industria láctea y Danalewich et al., (1998) sobre sus características. (Rodríguez, 2006) En cuanto al uso de sistemas lagunares para el tratamiento de aguas residuales lácteas se

encontró el trabajo de Sukias et al., (2001) donde evaluaron el desempeño de lagunas de estabilización facultativas a escala completa de una granja lechera en Nueva Zelanda. (Eduardo Ronzano, 2002).

## **2.2. Marco Legal**

Las Normas de Calidad de Agua en el país son fijados por el Ministerio del Ambiente MINAM teniendo en cuenta que los límites que se establecen en cada caso, sean factibles de ser alcanzados con los recursos locales disponibles para tal fin.

- Ley N° 29338 “Ley de Recursos Hídricos”
- Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, que aprueba los estándares Nacionales de Calidad de Agua.
- Decreto Supremo N° 023-2009.MINAM, que aprueba las disposiciones para la implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua.
- Decreto Supremo N°001-2010-ANA, que aprueba el reglamento de la ley N° 29338, Ley de recursos hídricos.
- Resolución Jefatural N°202-2010-ana, que aprueba la clasificación de cuerpos de aguas superficiales y marino-costeros.
- Resolución Jefatural N° 182-2011-ANA, que aprueba el protocolo Nacional de Monitoreo de calidad de los recursos hídricos superficiales.
- Ley de Recursos Hídricos N° 29338, en El Título III USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, se tiene los siguientes artículos relacionados con el uso de agua:

Artículo 35: Clases de usos de agua y orden de prioridad, reconoce las siguientes clases de uso de agua:

1. Uso primario
2. Uso poblacional

### 3. Uso productivo

- El Reglamento de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos (Decreto Supremo N° 001-2010-AG) y su modificación D.S N° 024-2014-MINAGRI.

Artículo 106.

2. sobre la Clasificación de los Cuerpos de Aguas, señala que la Autoridad Nacional del Agua clasifica los cuerpos de agua, tomando como base la implementación progresiva de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua (ECA- Agua), de acuerdo con los usos actuales y potenciales a que se destina el agua.

- Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, que aprueba los estándares Nacionales de Calidad de Agua.

Se aprobó los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, con el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente.

Según el ECA – Agua la clasificación de los cuerpos de agua es el siguiente:

Categoría 1: Poblacional y Recreacional

Categoría 2: Actividades marino costeras

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

A continuación se detalla los niveles de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua de categoría 3.

Tabla 2.1. *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Agua.*  
**Categoría 3: riego de vegetales**

<b>PARAMETROS PARA RIEGO DE VEGETALE DE TALLO BAJO Y TALLO ALTO</b>		
<b>PARAMETROS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
<b>Fisicoquímicos</b>		
Bicarbonatos	mg/L	370
Calcio	mg/L	200
Carbonatos	mg/L	5
Cloruros	mg/L	100-700
Conductividad	µS/cm	<2000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	10
Fluoruros	mg/L	1
Fosfatos=P	mg/L	1
Nitratos (NO <sup>3</sup> – N)	mg/L	10
Nitritos (NO <sup>2</sup> – N)	mg/L	0,06
Oxígeno disuelto	mg/L	>4
pH	Unidad de pH	6,5 – 8,5
Sodio	mg/L	200
Sulfatos	mg/L	300
<b>Inorgánicos</b>		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0,05
Cadmio	mg/L	0,005
Cromo (6+)	mg/L	0,1
Hierro	mg/L	1
Plomo	mg/L	0,05



Manganeso	mg/L	0,2
zinc	mg/L	2

Fuente: (MarcadorDePosición8)

Tabla 2.2. Bebida de animales

<b>PARAMETROS PARA BEBIDAS DE ANIMALES</b>		
<b>PARAMETROS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
<b>Fisicoquímicos</b>		
Conductividad	µS/cm	< = 5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	< = 15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40
Fluoruros	mg/L	2
Nitratos (NO <sup>3</sup> – N)	mg/L	50
Nitritos (NO <sup>2</sup> – N)	mg/L	1
Oxígeno disuelto	mg/L	>5
pH	Unidad de pH	6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	500
<b>Inorgánicos</b>		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0,1
Cadmio	mg/L	0,01
Cromo (6+)	mg/L	1
Hierro	mg/L	1
Plomo	mg/L	0,05
Manganeso	mg/L	0,2
Zinc	mg/L	24

Fuente: (MINAM, 2010)

### 2.3. Marco Conceptual.

- **Precipitación:** La precipitación es un proceso de obtención de un sólido a partir de una disolución. Puede realizarse por una reacción química, por evaporación del disolvente, por enfriamiento repentino de una disolución caliente, o por cambio de polaridad del disolvente. El sólido así obtenido se denomina precipitado y puede englobar impurezas. En general será necesario cristalizarlo y recristalizarlo.
- **Floculación:** Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas domésticas, industriales y de la minería.
- **Coagulación:** En una suspensión coloidal, no se puede conseguir, de forma efectiva, la separación de las partículas directamente por técnicas de separación sólido-líquido (decantación, flotación), como consecuencia del pequeño tamaño de las mismas, que se traduce en una muy pequeña velocidad de sedimentación.
- **Reacciones Redox:** Reacción redox es toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación. Para que exista una reacción de reducción-oxidación, en el sistema debe haber un elemento que ceda electrones, y otro que los acepte
- **Reacción de Oxidación:** La oxidación es una reacción química muy poderosa donde un elemento cede electrones, y por lo tanto aumenta su estado de oxidación. Se debe tener en cuenta que en realidad una oxidación o una reducción es un proceso por el cual cambia el estado de oxidación de un compuesto. Este cambio no significa necesariamente un intercambio de iones. Suponer esto -que es un error común- implica que todos los compuestos formados mediante un proceso redox son iónicos,

puesto que es en éstos compuestos donde sí se da un enlace iónico, producto de la transferencia de electrones.

- **Reacción De Reducción:** Reducción es una reacción química por el cual un átomo o un ion ganan electrones. Implica la disminución de su estado de oxidación. Este proceso es contrario al de oxidación.
- **Tiempo:** El tiempo de residencia, indican algunos autores determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo estos mismos autores señalan que sus variaciones resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ) la cual debe de disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es la cantidad de oxígeno requerido por un inóculo de bacterias para la descomposición de la materia orgánica en una muestra, durante 5 días a una temperatura de 20 °C (kg DBO). Puede ser expresado como unidad de concentración en agua (Kg DBO/m<sup>3</sup>), como cantidad de materia orgánica de un desecho o como cantidad de materia orgánica por equivalente habitante.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación completa de la materia orgánica por agentes químicos altamente oxidantes, como el permanganato de potasio, en un ambiente ácido.

- **Ánodo:** Se denomina ánodo al electrodo positivo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones negativos dentro del electrolito, que por esto reciben el nombre de aniones.
- **Cátodo:** Se denomina cátodo al electrodo negativo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos, que por esto reciben el nombre de cationes.
- **Potencial:** Como función de la energía libre del sistema), constituye la fuerza de empuje de una reacción electroquímica y por lo tanto representa el factor termodinámico.
- **Intensidad:** Es una medida de la cantidad de materia transformada en la unidad del tiempo y por tanto, representa factores cinéticos. Comúnmente representamos intensidad frente a potencial. Es decir, representamos la velocidad de una reacción (intensidad) como función de la fuerza de empuje (potencial. Los potenciales a los cuales estos procesos ocurren están relacionados a los potenciales estándar ( $E^\circ$ ) de las especies implicadas. Si en disolución tenemos más de una especie que puede ser oxidada o reducida, el orden en que dichos procesos tiene lugar depende del valor de  $E^\circ$  y de la cinética de la reacción electrolítica.
- **Influente:** Es el líquido a tratar que entra a un sistema de tratamiento, o alguno de sus elementos en particular.
- **Efluente:** Es el líquido que sale del sistema de tratamiento, o alguno de sus elementos en particular.
- **Ppm:** Partes por millón o miligramos por litro.
- **Ente Generador:** Persona física o jurídica, pública o privada, responsable del de aguas residuales, o de su vertido en un cuerpo receptor o alcantarillado sanitario
- **Agua residual:** Se consideran aguas residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (domésticas,

comerciales, industriales y de servicios), generalmente estas contaminadas por sustancias orgánicas e inorgánicas.

- **Precipitación:** Es un proceso de obtención de un sólido a partir de una disolución. Puede realizarse por una reacción química, por evaporación del disolvente, por enfriamiento repentino de una disolución caliente, o por cambio de polaridad del disolvente. El sólido así obtenido se denomina precipitado y puede englobar impurezas. En general será necesario cristalizarlo y recristalizarlo.
- **Floculación:** Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas domésticas, industriales y de la minería.
- **Coagulación:** En una suspensión coloidal, no se puede conseguir, de forma efectiva, la separación de las partículas directamente por técnicas de separación sólido-líquido (decantación, flotación), como consecuencia del pequeño tamaño de las mismas, que se traduce en una muy pequeña velocidad de sedimentación.

## 2.4. Marco Teórico.

### 2.4.1. Las fuentes de energía de las que abastecemos

El sol es nuestra principal fuente de energía, imprescindible para la vida sobre la Tierra ya que nos suministra calor y luz.

En tiempos de crisis con elevados precios de los productos energéticos, se han de buscar por todos los medios, otras energías alternativas que además de ser competitivas, resulten menos contaminantes. (Viloria, 2011)

Las principales energías que a día se utilizan son las que provienen de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural).

Son muy contaminantes y favorecen el efecto invernadero, que es uno de los principales problemas con que se encuentra este mundo tan modernizado y que necesita cada vez más energía.

Los acuerdos para reducir los niveles de contaminación (Kioto) no se cumplen, y el problema cada vez es mayor.

Una de las formas de energía más utilizadas es la electricidad, que se obtiene por diferentes procedimientos de transformación, como son algunos de los que se recogen en la tabla.

Tabla 2.3. Energías renovables y no renovables

<b>Energías no renovables</b>	<b>Energías renovables</b>
Carbón Petróleo Gas natural Nuclear Química	Solar (calor y luz) Paneles térmicos (calor) Módulos fotoeléctricos(electricidad) Eólica(viento) Hidráulica(agua) Biomasa Geotérmica
Estas energías no se renuevan, se agotan con el consumo y el paso del tiempo.	Estas energías se renuevan, y por lo tanto, no se agotan con su aprovechamiento o el paso del tiempo.

Fuente: (Viloria, 2011)

#### **2.4.1.1. La electricidad como principal energía**

En la tabla 4 se recogen los principales procedimientos para generar energía eléctrica a partir de diferentes elementos energéticos. (Viloria, 2011).

Tabla 2.4. Procedimientos para generar electricidad

Materia energética	Procedimientos para generar electricidad
Carbón	Central térmica
Petróleo	Central térmica
Gas natural	Central térmica y de ciclo combinado
Química	Pilas eléctricas
Luz del Sol	Módulos fotovoltaicos
Viento	Aerogeneradores
Agua	Centrales hidráulicas

Fuente: (Viloria, 2011)

#### **2.4.1.2. Energía Solar para Generar Electricidad**

La energía del sol que llega a nuestro planeta es aproximadamente 15,000 veces más de lo que toda la humanidad usa anualmente ( $1.5 \times 10^{18}$  kWh en 2006). En caso de interés, sugerimos observar esta película del Solar Dynamics Observatory de la NASA que visualiza este tremendo dinamismo, esencial para nuestra vida.

Hay una multitud de posibilidades para aprovechar de esta vasta cantidad de energía. Aparte de adquirir la energía del sol para calentar, convertir la radiación con paneles solares directamente en electricidad sin quemar nada es una opción atractiva que nos permite solucionar problemas de la electrificación en forma elegante, protegiendo el medio ambiente. (Viloria, 2011)

#### **2.4.1.3. Breve Historia de la Energía Fotovoltaica**

El fenómeno fotoeléctrico fue observado por primera vez en 1839 por el físico francés Alexandre Edmond Becquerel. En 1922 Albert Einstein recibió el Premio Nobel por su trabajo explicando este efecto. Investigaciones en los años siguientes lograron varios descubrimientos y avances. Las primeras patentes fueron otorgadas.

La necesidad de alimentar satélites con energía eléctrica daba un empuje decisivo para el desarrollo de celdas solares fotovoltaicas. En 1954 los laboratorios Bell lograron producir celdas fotovoltaicas en base de silicio convirtiendo hasta un 6% de la energía solar en electricidad. El satélite Vanguard (1958) fue el primero que llevó esta tecnología al espacio.

Le recomendamos ver esta película muy educativa (en inglés) de los archivos de AT&T: 'The Bell Solar Battery' con tomas históricas y muchas explicaciones, válidas hasta hoy: un viaje a través del tiempo (duración: 14 minutos). (Viloria, 2011)

En aquel tiempo las placas solares fueron muy caras y solo para usos especiales. Hoy, los precios son mucho más cómodos y se produce en enormes cantidades cada vez más para alimentar redes comunes de electricidad.

#### **2.4.1.4. Sistema Fotovoltaico**

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que aprovechan la energía producida por el sol y la convierten en energía eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos se basan en la capacidad de las celdas fotovoltaicas de transformar energía solar en energía eléctrica (DC). En un sistema conectado a la red eléctrica esta energía, mediante el uso de un inversor, es transformada a corriente alterna (AC), la cual puede ser utilizada en hogares e industrias.

La generación de energía eléctrica dependerá de las horas que el sol brille sobre el panel solar y del tipo y cantidad de módulos instalados, orientación, inclinación, radiación solar que les llegue, calidad de la instalación y la potencia nominal. (Viloria, 2011)

Los dispositivos a través de los cuales se absorbe la energía solar son las celdas solares. Estos son elementos de los sistemas fotovoltaicos que tienen la capacidad de producir energía eléctrica



al aprovechar la luz solar que incide en ellos. Las celdas solares se fabrican con materiales semiconductores, tales como el silicio, que tienen la función de recibir los fotones que viajan a través de los rayos solares.

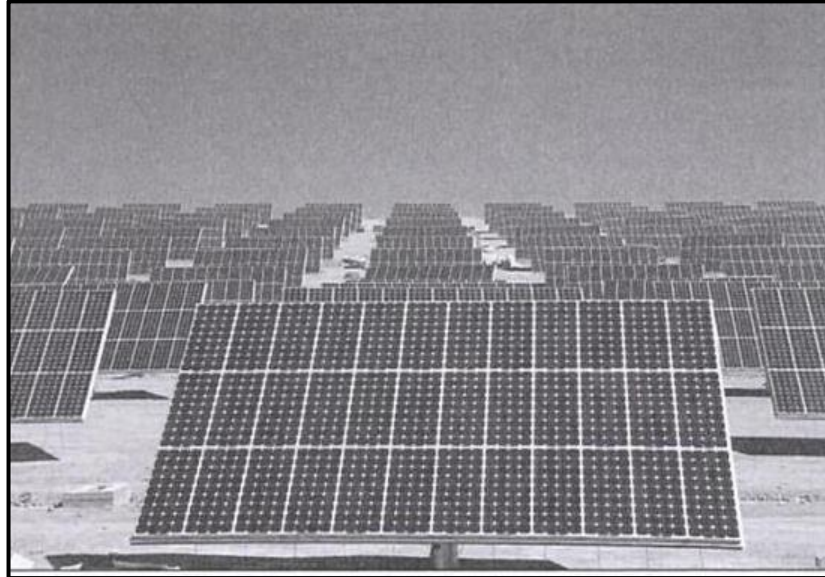
Principales componentes de los sistemas fotovoltaicos:

- Módulos de celdas solares
- Estructura para los módulos
- Instrumentos de operación
- Reguladores y controladores de voltaje
- Baterías de almacenamiento eléctrico
- Interruptores y cableado
- Red eléctrica alrededor.

#### **2.4.2. Energía solar fotovoltaica.**

Hoy por hoy, sin embargo, la energía solar FV apenas contribuye al suministro eléctrico mundial. Solo representa el 0.001% de ese suministro: pero el sector fotovoltaico se sustenta en una tecnología puntera, con un crecimiento medio anual en continuo crecimiento en 2004 se instalaron 927 MW en el mundo, un 62% más que en 2003, lo que favorece una continua reducción de sus precios. Las estimaciones son que al final de la presente década los costes serán un 30-40% más bajos que en la actualidad y que diez años más tarde esta fuente de energía podría proporcionar electricidad a mil millones de personas en el mundo. (Viloria, 2011).

Figura 2.1. Accionar energético.



Fuente: (Viloria, 2011)

La energía eléctrica de origen fotovoltaico es una energía renovable. Las energías renovables tienen ventajas sobre las no renovables, como:

- Son respetuosas con el medio ambiente.
- Son mucho menos contaminantes que las energías de origen fósiles.
- Apenas tienen residuos.
- Disponemos de ellas, por la que no crean dependencia de suministros externos.
- Son renovables, no se agotan.
- No tienen coste. La energía básica, en este caso, la luz, solo depende del lugar geográfico.
- Su competitividad depende de cómo estén los precios del mercado de las energías.

En el caso concreto de España, disponemos de muy buena radiación solar, con muchas horas de Sol, lo que permite invertir en

este aprovechamiento del calor, por un lado, y el efecto de la luz generar electricidad por medio de módulos fotovoltaicos, por otro. (Viloria, 2011)

Tabla 2.5. Aplicaciones de la energía eléctrica generada a través de módulos fotovoltaicos.

<p><b>Electrificación rural</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viviendas rurales</li> <li>• Refugios de montaña</li> <li>• Dependencias varias</li> <li>• Alumbrado de zonas varias</li> <li>• Alumbrado de túneles</li> </ul>
<p><b>Usos agrícolas, ganaderos y forestales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riegos (bombeo)</li> <li>• Alumbrado de casetas</li> <li>• Alumbrado de establos, granjas, etc.</li> <li>• Ordeñadoras eléctricas</li> <li>• Electrificación de cercas</li> <li>• Refrigeración de diferentes elementos</li> <li>• Sistema de detección de incendios</li> <li>• Comunicaciones varias</li> </ul>
<p><b>Telecomunicaciones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentación de repeticiones</li> <li>• Alimentación a amplificadores-repetidores</li> <li>• Alimentación a radiofaros y balizas de señales</li> <li>• Alimentación a equipos de radio</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Telecontrol de estaciones meteorológicas</li> </ul>
<b>Señalización y control</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iluminación de vallas publicitarias</li> <li>• Boyas y faros de navegación marítima</li> <li>• Señalización para ferrocarriles</li> <li>• Control de invernaderos</li> <li>• Control de pasos a nivel</li> <li>• Señalización e iluminación de aeropuertos</li> </ul>
<b>Aplicaciones militares</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cargadores de baterías</li> <li>• Radioteléfonos</li> <li>• Generación de electricidad para usos varios</li> </ul>
<b>Industria espacial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentación de satélites y sondas</li> <li>• Comunicación con satélites</li> </ul>
<b>Industria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de energía eléctrica para suministrarla a la red general de baja tensión</li> </ul>
<b>Varios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alumbrado de zonas donde no llega la red eléctrica</li> <li>• Alimentación a caravanas y tiendas de campaña</li> </ul>

Fuente: (Viloria, 2011)

Como puede apreciarse, las aplicaciones de esta forma de energía son muchas y permiten llevar los avances tecnológicos con los que ahora nos beneficiamos a muchos lugares, por remotos que estén. (Viloria, 2011)

La aplicación a las comunicaciones, junto con el del alumbrado de zonas alejadas de redes eléctricas y la generación de energía eléctrica para suministrar a la red, es una de las principales aplicaciones de este sistema de obtener energía eléctrica, a partir de la luz que nos llega del Sol.

Cada día son mayores las aplicaciones de este tipo de instalaciones, razón por la cual se necesitan instaladores bien preparados y cualificados para realizar instalaciones y después conservarlas.

Agrupación de instalaciones fotovoltaicas por su potencia pico de generación. (Viloria, 2011)

Estas instalaciones pueden suministrar corriente continua (CC) o corriente alterna (CA) en función de la aplicación que se haga de la energía eléctrica.

#### **2.4.2.1. Tecnología**

La base de esta tecnología se encuentra en el efecto fotovoltaico, descubierto en 1839 por el físico Antoine Becquerel y que se produce cuando la luz del sol incide sobre un material capaz de absorber esta radiación y transformarla en energía eléctrica. Esto ocurre porque los fotones de la luz transmiten su energía a los electrones del material, activándolos y haciendo que parte de ellos asciendan a la superficie y así se genere una corriente eléctrica capaz de circular por un circuito externo.

Estos materiales se conocen como semiconductores. Por lo tanto, las células fotovoltaicas, elemento base de esta tecnología, están elaboradas con materiales semiconductores, generalmente silicio,

muy abundante en nuestro planeta (su combinación con el oxígeno forma el 60% de la corteza terrestre). La cantidad de silicio necesaria para producir 1 MWp (megavatio pico) de células es actualmente del orden de 15,3 toneladas, y se espera que en el año 2010 se reduzca a 10 toneladas. (Viloria, 2011)

#### **2.4.2.2. Tipos de células**

Existen células de silicio monocristalino, policristalino y amorfo.

Las monocristalinas se fabrican a base de lingotes puros de silicio (el mismo que se utiliza en la fabricación de chips electrónicos). Las policristalinas se elaboran a partir de la refundición de piezas de silicio monocristalino y, aunque su rendimiento es ligeramente inferior, su adquisición es también menos costosa. Las células de silicio amorfo se obtienen a partir de la deposición de capas delgadas sobre vidrio. El rendimiento de estas células es menor que el de las de silicio cristalina, razón por la cual se destinan a aplicaciones de pequeña potencia (calculadoras, relojes, etc). (Viloria, 2011)

Recientemente se han desarrollado dos nuevas tecnologías a base de silicio: el silicio en bandas, que tiene la particularidad de ser flexible, y la de película de silicio. Otras tecnologías prometedoras son las denominadas de “capas delgadas” o “capas finas”. En ellas, el material semiconductor no es silicio, sino, por ejemplo, seleniuro de cobre e indio (CIS) y va en una proporción menor, ya que es aplicado en forma pulverizada y no precisa ser cortado, como en el caso de las tecnologías cristalinas.

Existen también otras tecnologías, como las células de concentración o espejos, que concentran los rayos de sol sobre la célula. Estos sistemas son más adecuados para lugares soleados, ya que las lentes deben “ver” el Sol, para seguirlo y concentrarlo continuamente sobre la célula.

Entre unas a otras, parece previsible que las nuevas tecnologías reduzcan notablemente los costes de producción de la energía solar fotovoltaica.

#### **2.4.2.3. El módulo FV**

La conexión de células fotovoltaicas y su posterior encapsulado y enmarcado dan como resultado los paneles o módulos fotovoltaicos.

Las condiciones de funcionamiento de estos módulos dependen de algunas variables externas, como la radiación solar y la temperatura de funcionamiento.

Por ello, se han definido unas condiciones de trabajo estándar que permitan medir y comparar correctamente los diferentes módulos fotovoltaicos. Estas condiciones se han normalizado para una temperatura de funcionamiento de 25°C y una radiación solar de 1.000 W/m<sup>2</sup>. (Viloria, 2011)

Los paneles solares fotovoltaicos pueden exponerse sin problemas a la intemperie, ya que sus componentes eléctricos se encuentran aislados del exterior y cada uno de ellos suele tener un peso medio de 15kg/m<sup>2</sup>, más el peso de la estructura soporte, que es aproximadamente de 10kg/m<sup>2</sup>. Su mantenimiento es muy sencillo, se reduce a limpiarlos con algún producto no abrasivo cuando se detecte suciedad, y duran en torno a 30 años, incluso más. Tienen, además, la ventaja de que son fáciles de instalar, silenciosos y no producen ningún tipo de contaminación ambiental.



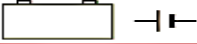

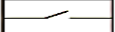















Para saber la energía que produce un sistema fotovoltaico hay que multiplicar su potencia nominal por el número de horas pico (no todas las horas de sol tienen la intensidad considerada como pico; 1.000W/m<sup>2</sup>), Para tener una idea aproximada de cuanto es, en verano hay unas 5 horas solares pico, y en invierno entre 2 y 4 si bien estos datos varían según la zona. (Viloria, 2011)

### 2.4.3. Clasificación de instalaciones solares fotovoltaicas

Las instalaciones fotovoltaicas se clasifican en:

- Instalaciones fotovoltaicas (FV) aisladas.
- Instalaciones fotovoltaicas (FV) conectadas a la red general.

Figura 2.2. Principales símbolos utilizados en los esquemas

Símbolo	Denominación	Símbolo	Denominación
	Módulo o panel fotovoltaico		Fusible o cortacircuito
	Batería		Interruptor
	Regulador		Conductor eléctrico
	Inversor		Línea monofásica
	Rectificador		Línea trifásica
	Convertidor		Contador de energía entrada-salida [Importador-Exportador]
	Varistor Descargador de sobretensión		Contador de energía de entrada
	Diodo		Conexión a tierra
	Transformador		Masa
	Motor de CC		Motor de CA

Fuente: (Viloria, 2011)

Figura 2.3. Conexiones exteriores de paneles fotovoltaicos



Fuente: (Viloria, 2011)



### 2.4.3.1. Instalaciones aisladas de la red

Como hemos indicado en la introducción, son muchas las aplicaciones de la generación eléctrica fotovoltaica, pero podemos reunir las en dos grandes grupos, que son: instalaciones aisladas de la red e instalaciones conectadas a la red. (Viloria, 2011)

Son instalaciones aisladas de la red, las que no tienen ninguna relación y conexión con la red eléctrica convencional. Son el tipo más común de instalaciones fotovoltaicas, aplicándose en instalaciones domésticas, alumbrado telecomunicaciones pueden ser:

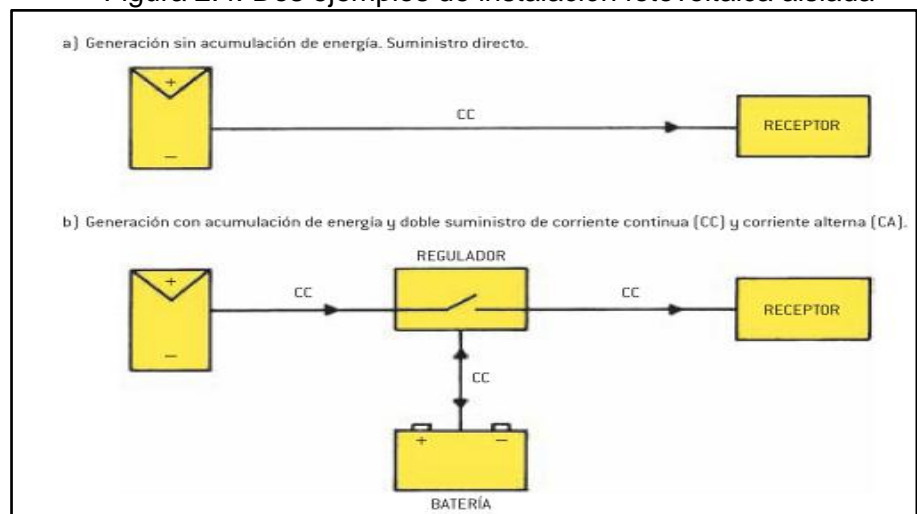
- Sin acumulación de energía.
- Con acumulación de energía (baterías).

En el apartado presentan varios ejemplos de instalaciones fotovoltaicas, correspondientes a este grupo.

a) Generación sin acumulación de energía, Suministro directo.

b) Generación con acumulación de energía y doble suministro de corriente continua (CC) y corriente alterna (CA).

Figura 2.4. Dos ejemplos de instalación fotovoltaica aislada



Fuente: (Viloria, 2011)

### 2.4.3.2. Instalaciones conectadas a la red

Son instalaciones de generación fotovoltaica que después de adaptar la corriente a los valores de la red eléctrica general, se conecta con ella. Las instalaciones de generación fotovoltaica que solo tienen este fin, no incluyen en si instalación regulador, no baterías de acumulación, solamente inversor de CC a CA. (Viloria, 2011)

Hay instalaciones que podemos clasificarlas como mixtas, y son aquellas que generan electricidad para consumo propio, u el sobrante se envía a la red eléctrica general.

Las instalaciones de generación de energía eléctrica fotovoltaica, también se pueden clasificar en función a si potencia, tal como se indica en la tabla.

Tabla 2.6. Clasificación y rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas en función de su potencia

Tipo de instalación	Potencia	Rendimiento global de la instalación
Pequeñas instalaciones	Entre 1 y 5 kW	0,750
Medianas instalaciones	Entre 5 y 100 kW	0,775
Grandes instalaciones	Entre 100 kW y 1 MW	0,800
Centrales fotovoltaicas	Entre 1 y 50 MW	0,825

Fuente: (Viloria, 2011)

### 2.4.3.3. Sistema de protección y seguridad en el funcionamiento de las instalaciones

Para disponer la protección y la seguridad de las instalaciones, cuantos más datos y características conozcamos de las mismas, tanto mejor- empezaremos siguiendo un orden, como puede ser:

- Clase corriente, CC o CA.

- Conductores y sus sección (S).
- Tensión (U).
- Intensidad de corriente (I).

#### **2.4.3.4. Protección y seguridad**

El calibrado de los elementos de protección se ajustará a los datos anteriores. Los principales dispositivos de protección, son los siguientes:

- Diodos que impidan retornos de corriente al circuito de los paneles fotovoltaicos.
- Fusibles o cortacircuitos contra corrientes elevadas o de cortocircuitos.
- Relés de descarga automática de sobretensiones.
- Interruptores automáticos de efecto magnético, contra corrientes muy elevadas y de cortocircuito.
- Interruptores automáticos de efecto magneto- térmicos, contra sobreintensidades (sobrecargas) y corrientes muy elevadas, y de cortocircuito.
- Interruptores diferenciales, contra corrientes derivadas a masa.
- Puesta a tierra de los paneles fotovoltaicas y otros elementos de la instalación que así lo determine la norma (RECT)

#### **2.4.3.5. Usos y aplicaciones**

Los sistemas hoy disponibles para realizar un uso efectivo de la energía solar y convertirla en electricidad se dividen en dos grandes grupos; sistemas autónomos sin conexión a la red y sistemas conectados a la red. (Viloria, 2011)

Esta obra estudia la tecnología de la obtención de energía eléctrica a partir de módulos o paneles fotovoltaicos, la realización y el mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas y las aplicaciones de las mismas.

El campo de esta tecnología es muy amplio y está en constante evolución, tanto para conseguir mejores rendimientos de los elementos fotovoltaicos, como de sus aparatos, instalaciones y aplicaciones. (Viloria, 2011)

Los paneles generan electricidad, y por tanto, las instalaciones y los receptores también serán eléctricos. Hay unos aparatos de control que son propios de esta tecnología sin embargo, todo lo que se refiere a aparamenta, es la misma o similar que la de otras instalaciones de baja tensión que también se estudian en esta obra. El aprendizaje de este módulo profesional se hará con los siguientes conocimientos de materias:

- Normativa aplicada.
- Física eléctrica aplicada.
- Aparamenta eléctrica.
- Materiales que intervienen en la generación solar fotovoltaica.
- Instalaciones básicas fotovoltaicas.
- Interpretación y diseño de esquemas.
- Mediciones y verificaciones eléctricas.
- Cálculos de elementos de la instalación fotovoltaica.
- Planificación de los trabajos de montaje y mantenimiento.
- Montaje de paneles.
- Conexión de receptores.
- Elaboración de documentos técnico-administrativa.
- Mantenimiento y conservación de este tipo de instalaciones.
- Seguridad en el trabajo y formas de actuar ante el accidente.
- Aplicación de criterios de calidad en la ejecución de las tareas.
- Organización de trabajos (preparación, ejecución, puesta en marcha y mantenimiento de las instalaciones).

#### **2.4.3.6. Disponibilidad y vida útil de la instalación**

Las instalaciones fotovoltaicas son muy fiables y su disponibilidad operativa se acerca al 100% aunque la producción varía en función de la radiación solar de cada momento. Además, el mantenimiento que requieren es muy escaso. La vida útil de una planta fotovoltaica está marcada por la vida útil de sus componentes, principalmente el generador o módulo fotovoltaico, que constituye el principal valor de la instalación. (Viloria, 2011)

Los módulos tienen una vida esperada de más de 40 años. De momento no se tiene datos para saber con exactitud la vida real de un generador conectado a red, porque no se tiene suficientes perspectivas.

#### **2.4.3.7. Instalaciones fotovoltaicas en el Perú**

En el **Perú**, con su alta radiación solar, se usa esta forma de energía en la telecomunicación y cada vez más en la agricultura por ejemplo para el bombeo de agua, en minas y otras industrias. (MEM)

#### **2.4.3.8. Electrificación en zonas aisladas**

De importancia es el uso para la electrificación rural. Con una parte importante de la población rural todavía sin conexión a la red, la energía solar fotovoltaica es, en vista de una escasa densidad de población, las vastas distancias y otros retos, frecuentemente la forma más económica para brindar electricidad a casas, oficinas, escuelas, centros de salud y otros establecimientos. Desde los años 80 (más de 25 años) existen proyectos de energía solar y el gobierno cada vez más promueve esta forma de energía para la población rural aislada. Actualmente un proyecto del gobierno para electrificar hasta 500,000 hogares con energía solar está en proceso.

El escaso poder adquisitivo de la población rural es un problema fundamental que no permite a muchos comprar estos sistemas inicialmente costosos. Para cambiar esta situación, existen varios propuestos, desde usar picosistemas de muy bajo consumo y económicamente accesibles hasta facilitar créditos de condiciones favorables para la población rural. El insuficiente conocimiento y la poca familiaridad con sistemas solares representan otras barreras para aceptar ampliamente esta tecnología. Existe la necesidad, pero todavía no resulta en una demanda extendida por gran parte de la población. (Viloria, 2011)

#### **2.4.3.9. Atlas Solar del Perú**

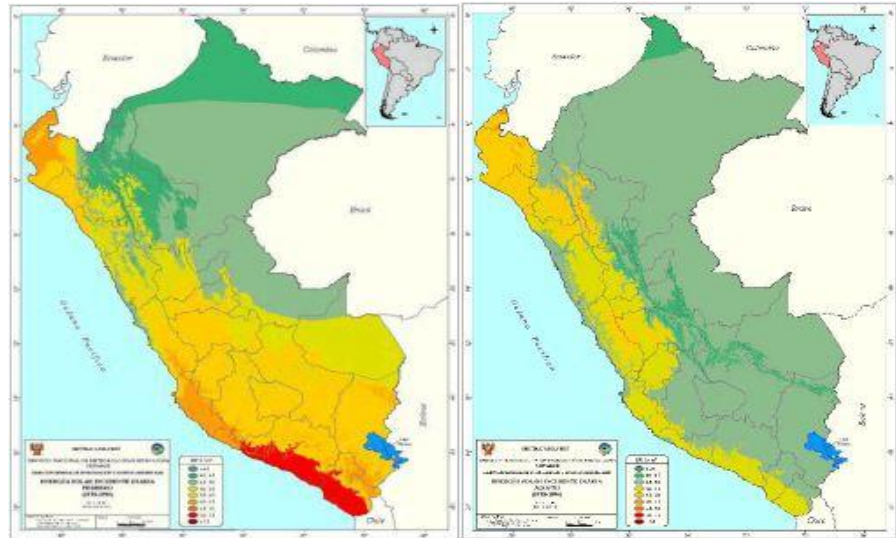
Perú, consciente de su situación privilegiado por la cantidad de la radiación solar, elaboró, como parte de su programa de electrificación rural, el Atlas Solar que comprueba las condiciones excelentes para aprovechar de la energía solar.

En la página del Ministerio de Energía y Minas (MEM) se encuentra la versión interactiva del Atlas Solar del Perú, publicado en 2003 como parte de los programas para reforzar la electrificación rural con sistemas fotovoltaicos. Aquí mostramos los mapas con la situación para Febrero (izquierda) y Agosto (derecho). Estos meses en general son los más extremos en el país (verano o invierno, temporada seca o de lluvia). El promedio anual de la irradiancia (la radiación solar que llega a la tierra) varía desde 4.5 en la Amazonía hasta 6.5kWh/día en el sur. En la zona del altiplano es más de 5.5kWh/día! (MEM)

Estos valores son excelentes y altamente favorecen instalaciones en todo el país. Para poner estos datos en relación: por ejemplo en Alemania, donde la mayoría de los sistemas fotovoltaicos al nivel mundial están instalados, el promedio anual de la radiación llega solamente a 3.01kWh/día.

Aquí se puede descargar mapas adicionales con la radiación solar por departamento o con la radiación solar por mes.

Figura 2.5. Atlas solar del Perú



Fuente: Dirección General de Electrificación Rural (DGER-MEM).

#### 2.4.4. Aguas residuales

Llamamos aguas residuales a las aguas que resultan después de haber sido utilizadas en nuestros domicilios, en las fábricas, en actividades ganaderas, etc. Las aguas residuales aparecen sucias y contaminadas: llevan grasas, detergentes, materia orgánica, residuos de la industria y de los ganados, herbicidas y plaguicidas... y en ocasiones algunas sustancias muy tóxicas.

Estas aguas residuales, antes de volver a la naturaleza, deben ser depuradas. Para ello se conducen a las plantas o estaciones depuradoras, donde se realiza el tratamiento más adecuado para devolver el agua a la naturaleza en las mejores condiciones posibles.

Todavía existen muchos pueblos y ciudades de nuestro país que vierten sus aguas residuales directamente a los ríos, sin depurarlas. Esta conducta ha provocado que la mayoría de los

seres vivos que vivían en esos ríos hayan desaparecido (Eddy., 2004).

#### **2.4.4.1. Aguas Residuales Industriales Lácteas**

Las aguas residuales de las industrias lácteas son generalmente neutras o poco alcalinas, pero tienen tendencia a volverse ácidas muy rápidamente a causa de la fermentación del azúcar de la leche produciendo ácido láctico, sobre todo en ausencia de oxígeno y la formación simultánea de ácido butírico, descendiendo el pH a 4,5 – 5,0. La composición de estas aguas incluye sustancias orgánicas disueltas como la lactosa, sales minerales y suspensiones coloidales de proteínas (caseína, albúminas, y globulinas) con una DQO entre 2000 – 4000 mg/L y una DBO entre 2000 – 3000 mg/L. El consumo de agua en las industrias lácteas oscila entre 8,0 – 35 L/kg de leche. (Veisseyre, 1988).

#### **2.4.4.2. Lactosuero**

El lactosuero es definido como “la sustancia líquida obtenida por separación del coágulo de leche en la elaboración de queso” (Parra, 2009) Es un líquido translúcido verde obtenido de la leche después de la precipitación de la proteína (caseína).

El lactosuero que se libera, corresponde a cerca del 83% del volumen de leche utilizada como materia prima, el cual es exudado desde el interior de la cuajada de queso. Este residuo corresponde al efluente que más contaminación provoca en las queserías si no se tiene un aprovechamiento posterior, ya que contiene gran cantidad de lactosa y proteínas. Por ello es aconsejable que estos sueros no sean vertidos de forma directa al cauce o a la depuradora, pues provocarían un enorme incremento de la DBO y la DQO.

Algunas posibilidades de la utilización de este residuo han sido propuestas, pero las estadísticas indican que una importante



porción de este residuo es descartada como efluente, el cual crea un serio problema ambiental (Aider, 2009), debido a que afecta física y químicamente la estructura del suelo. Lo anterior resulta en una disminución en el rendimiento de cultivos agrícolas y cuando se desecha en el agua, reduce la vida acuática al agotar el oxígeno disuelto (Parra, 2009) o provoca eutrofización de acuíferos.

El lactosuero es un residuo al que se debe dar una salida que no provoque contaminación. Por ello, en las plantas más modernas se deshidrata para obtener lactosuero en polvo, también puede obtenerse proteína y lactosa en polvo; etc., productos con un alto valor añadido y de fácil venta (Koutinas, Papapostolou, Dimitrellou, Kopsahelis, Katechaki, & Bekatorou, 2009). Para el criador de ganado porcino y bovino, este residuo constituye una materia prima en la alimentación bajo determinadas condiciones (composición, suministro y precios) (Peters, 2005)

El suero lácteo es considerado un producto de alto valor nutritivo, específicamente por sus proteínas séricas, que son de muy buena calidad debido a que aportan aminoácidos esenciales que poseen un alto coeficiente de absorción (Charles Alais, 1985) Además, contiene lactosa y un perfil de minerales donde se destaca la presencia de potasio (K), lo que favorece la eliminación de líquidos y toxinas del organismo, dispone también de calcio (Ca), fósforo (P) y magnesio (Mg), y oligoelementos como zinc (Zn), hierro (Fe) y cobre (Cu), formando sales de gran biodisponibilidad para el organismo.

Dados los factores de variabilidad reseñados anteriormente se puede encontrar una gama de lactosueros que fluctúan entre dos tipos extremos: ácidos y dulces. Sus características principales se muestran en la tabla 7.

Un suero ácido se produce cuando el coágulo se forma por la adición de ácidos, presentando un pH próximo a 4,5. Esto es, al alcanzar el punto isoeléctrico de la caseína con anulación de las cargas eléctricas que las mantienen separadas, impidiendo la floculación. Lo que conlleva a una total desmineralización de la micela y a la destrucción de la estructura micelar (gel muy frágil). Obteniéndose así, un suero muy mineralizado, pues contiene más del 80% de los minerales de la leche. En éste, el ácido láctico secuestra el Ca del complejo de paracaseinato cálcico, produciendo lactato cálcico. El P de la caseína se encuentra bajo la forma de monoéster ortofosfórico de un aminoácido hidroxilado (Abaigar, 2009).

Tabla 2.7. Origen y principales características de los lactosueros de la Elaboración de Quesos

	<b>Lactosuero Acido</b>	<b>Lactosuero Dulces</b>
Origen	Proviene de la fabricación de quesos frescos y de su pasta blanda.	Proviene de la fabricación de quesos de pasta cocida y prensada.
Características	Una parte de la lactosa se ha transformado en ácido láctico y son ricos en Ca y P.	Pobres en ácido láctico y en calcio y fosforo.

**Fuente:** (Abaigar, 2009).

La composición del lactosuero en gramos por kg del producto bruto, se muestra en la tabla 8 (Abaigar, 2009). Ambos tienen altos contenidos de lactosa, proteínas y grasa. Como se puede observar el lactosuero ácido principalmente, sí es rico en fósforo, unas 10-12 veces más que el que puede estar presente como promedio en los

residuos acuosos lácteos, por lo cual se hace interesante la recuperación de éste como valor agregado.

Tabla 2.8. Composición promedio de los lactosueros dulces y ácidos derivados de la elaboración de quesos

<b>Componentes</b>	<b>Lactosueros dulces</b> (g/kg de lactosuero)	<b>Lactosueros ácidos</b> (g/kg de lactosuero)
Materia seca (MS)	55-75	55-65
Lactosa	40-50	40-50
Grasa bruta (GB)	0-5	0-5
Proteína bruta (PB)	9-14	7-12
Cenizas	4-6	6-8
Calcio	0.4-0.6	1.2-1.4
Fósforo (Fosfato g/L)	0.4-0.7 (1.0-3.0)	0.5-0.8 (2.0-4.5)
Potasio	1.4-1.6	1.4-1.6
Cloruros	2.0-2.2	2.0-2.2
Ácido láctico	0-0.3	7-8
pH	> 6.0	< 4.5
Grados Dornic	< 20°	> 50 °

Fuente: (Abaigar, 2009).

#### **2.4.4.3. Las técnicas Electroquímicas como alternativa para el tratamiento de aguas**

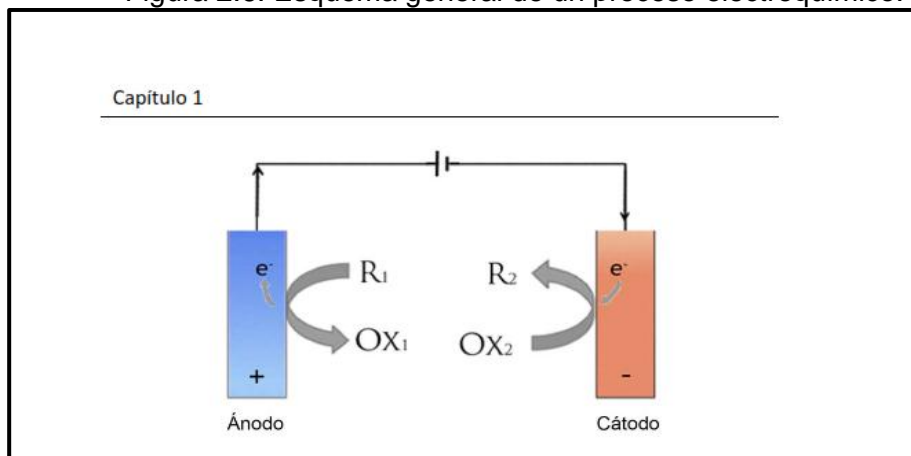
Los métodos descritos en el apartado anterior no han sido totalmente útiles para resolver el problema de la industria que necesita verter sus aguas residuales al sistema de alcantarillado, por lo que en esta tesis se propone una alternativa a estos métodos tradicionales. Esta propuesta consiste en la utilización de técnicas electroquímicas para realizar un tratamiento integral de las aguas que permita minimizar el coste, disminuir los residuos sólidos

generados y aplicar un tratamiento eficiente del que se obtenga un efluente con unos parámetros de vertido por debajo de los exigidos por la legislación y que sea reutilizable siempre que sea posible. (Valero, 2014)

De forma general, las técnicas electroquímicas utilizadas se pueden describir como aquellas en las que se transforma energía eléctrica en energía química, al hacer circular sumergidos en el mismo. La principal ventaja es que el reactivo fundamental es el electrón que circula al cerrar el círculo eléctrico, que es un reactivo limpio puesto que no deja ningún residuo tras su utilización (Valero, 2014).

Los procesos que ocurren en los reactores son reacciones de óxido-reducción, y siguen el esquema general que se presenta en la figura.

Figura 2.6. Esquema general de un proceso electroquímico.



Fuente: (Valero, 2014)

A partir de este esquema general derivan diversas técnicas que difieren, fundamentalmente, en el modo en que se aplica la corriente, en el material que se utiliza como electrodo, en las condiciones físico-químicas del agua a tratar y el diseño del reactor. En esta tesis se estudiara la utilización de tres técnicas: la electrocoagulación (EC), la electrooxidación (EO) y la electrodialisis

(ED), que se muestran como una alternativa competitiva para el tratamiento de aguas residuales industriales procedentes de diversos sectores (Valero, 2014) Estas técnicas han sido estudiadas para el tratamiento de contaminantes concretos, mediante estudios realizados utilizando aguas sintéticas, o para el tratamiento de aguas residuales de otros sectores industriales, utilizando muestras reales. Sin embargo, no se conocen estudios sobre el tratamiento de las aguas del sector de la almendra por métodos electroquímicos, por lo que se propone la aplicación de una combinación de técnicas mediante las que dar una solución al problema.

#### **2.4.4.4. Electrocoagulación**

La electrocoagulación (EC) es una técnica que se conoce y utiliza desde hace más de un siglo. Fue patentada en 1906 por A.E. Dietrich y se utilizó durante las primeras décadas del siglo XX para posteriormente perder relevancia en el campo del tratamiento de aguas. En los últimos años su uso ha resurgido debido a la necesidad de tratamientos más económicos para el tratamiento de aguas residuales ya que a su vez generen menos (García, 2012). La coagulación es un fenómeno por el cual las partículas coloidales con carga de una disolución son neutralizadas por la presencia de contraiones que desestabilizan la suspensión, provocando que las partículas formen aglomerados y sedimenten (Krishnam Rajeshwar, 1997). En la coagulación química se añaden sustancias químicas, como  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  u otras sales de aluminio o hierro, que consiguen la coagulación pero aumentan la conductividad y necesitan un ajuste muy fino de la dosificación (Huijuan Liu, 2010). En la EC el agente coagulante es generado in situ mediante la oxidación electrolítica de un ánodo de un material adecuado. De esta forma se pueden eliminar especies iónicas cargadas

haciéndolas reaccionar con iones de carga opuesta o con floculos ya formados de hidróxidos metálicos generados en las propias aguas. El ánodo utilizado se disuelve y se va consumiendo con el paso de la carga, por lo que se denomina “ánodo de sacrificio” y su duración depende de la masa inicial, de la carga circulada y las horas de uso. Los ánodos de sacrificio utilizados deben ser sustituidos cada cierto tiempo debido al desgaste, además de que se pueden formar películas de óxido o suciedad sobre los electrodos que provocan una pérdida de eficiencia y un incremento en el consumo eléctrico (Diaz C. E., 2014)

La EC se ha utilizado para el tratamiento de aguas con una gran variedad de contaminantes y de distintas procedencias como: metales pesados tintes textiles residuos con aceites (Restrepo, 2006) residuos poliméricos, lixiviados de vertederos industria papelera, residuos fenólicos, arsénico, mataderos, nitratos, residuos de sustancias para pulidos, purines, lavanderías y agroalimentarios Algunas de las ventajas principales de la EC son:

- La EC requiere montajes experimentales simples, fáciles de operar y modulables, por lo que se pueden diseñar equipos transportables.
- La cantidad de lodos generados es pequeña, y los flóculos formados son más estables en medios extremos, contienen menor cantidad de agua y presentan mejor comportamiento en la etapa de filtración y deshidratación.
- La EC es capaz de eliminar las partículas coloidales más pequeñas.
- Se evita el uso de reactivos químicos y por lo tanto se evita la necesidad de neutralizar los excesos así como la contaminación por la presencia de estos.

- Las burbujas de gas generadas ayudan a la separación por flotación de los flocos generados.

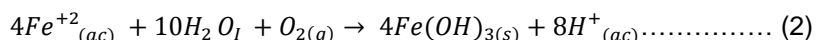
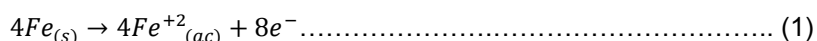
Durante los procesos de EC se dan un gran número de fenómenos físicos y químicos derivados de la circulación de la carga y de la generación de agente coagulante en el mismo medio en el que se encuentran los contaminantes ((Mollah, 2001) Estos procesos se pueden dividir en tres etapas:

- Formación del coagulante por disolución del material electródica.
- Rotura de las emulsiones y desestabilización de las partículas coloidales;
- La agregación de las partículas coloidales para formar flóculos. Además de estos procesos físicos, se dan dos reacciones principales en los electrodos

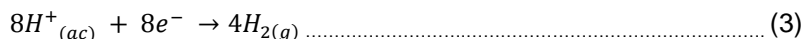
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso  $Fe(OH)_2$  o hidróxido férrico  $Fe(OH)_3$ .

**Mecanismo 1:** Formación del hidróxido férrico

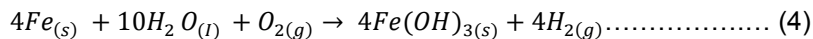
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones de oxidación:



En el cátodo ocurre la reacción:

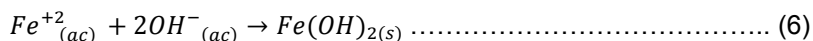
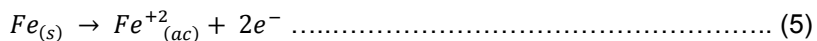


Reacción global:

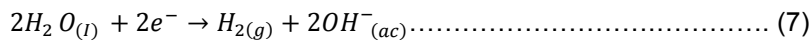


**Mecanismo 2 :** Formación del hidróxido ferroso

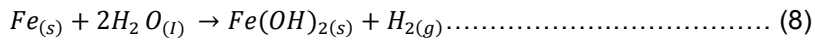
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



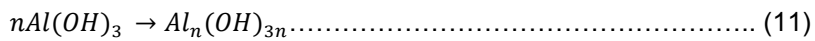
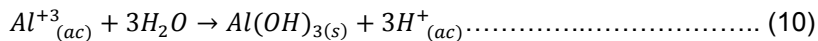
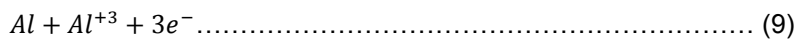
Reacción global:



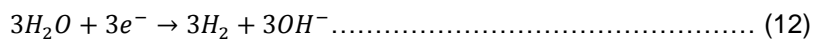
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas. (Mollah, 2001)

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes:

En el ánodo:



En el cátodo:



Los iones  $Al^{+3}$  en combinación con los  $OH^-$  reaccionan para formar algunas especies monoméricas como:

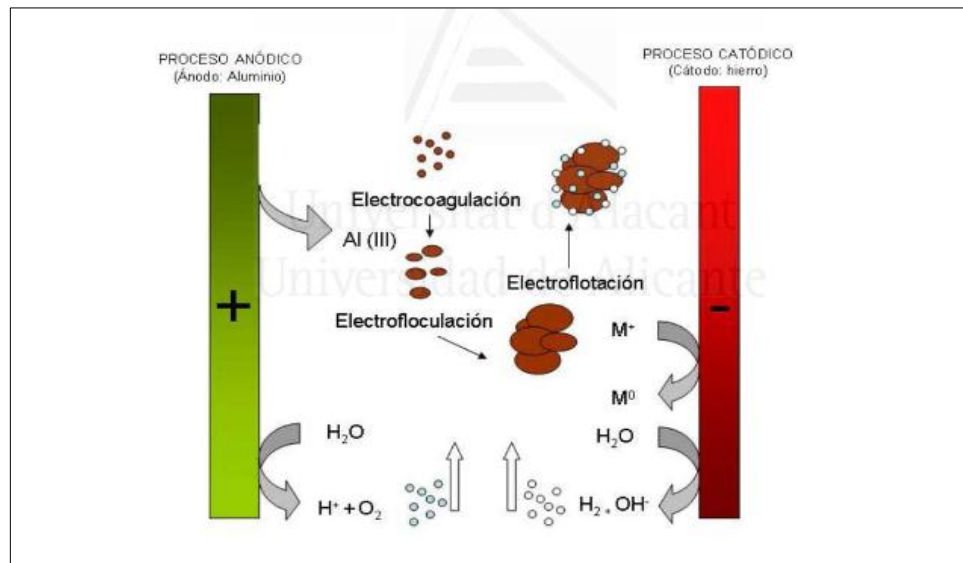
$Al(OH)_2^+$ ,  $Al_2(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_2^+$ , y otras poliméricas, tales como  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$  y  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ .

Que por procesos de precipitación forman el  $Al(OH)_{3(s)}$ , como se muestra en la reacción de ánodo.

El  $Al(OH)_{3(s)}$  es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes.



Figura 2.7. Proceso en un reactor de electrocoagulación.



Fuente: (Chen, 2004)

Durante el proceso de EC, la cantidad de metal que se disuelve en el ánodo depende directamente de la cantidad total de carga eléctrica circulada y se puede determinar estableciendo una relación entre estos parámetros (ecuación 1.8) gracias a la ley de Faraday:

$$w = \frac{ItM}{nF}$$

donde  $w$  es la cantidad de metal disuelto (g),  $I$  es la cantidad empleada en el procesos (A),  $t$  es el tiempo de tratamiento (s),  $M$  es la masa molar del metal ( $\text{g mol}^{-1}$ ),  $n$  es el número de electrodos intercambiados en el proceso de oxidación y  $F$  es la constante de Faraday( $96485 \text{ Cmol}^{-1}$ ). Además de por esta vía de oxidación electródica, parte del metal del ánodo se puede oxidar por los procesos de corrosión que ocurrirá al estar en el medio acuoso.

Los parámetros físico-químicos de las aguas a tratar afectan al rendimiento del proceso y se deben optimizar para cada caso

concreto, teniendo en cuenta el tipo de contaminantes presentes. Los reactores para EC deben de estar diseñados teniendo en cuenta estas condiciones por lo que los parámetros a optimizar serán: pH, conductividad, temperatura, caudal, régimen de turbulencia, distancia entre electrodos y densidad de corriente, entre otros. (Chen, 2004).

- **Concentración de cloruros**

Se ha demostrado como la presencia de una concentración mínima de 60ppm de cloruro favorece la disolución del electrodo de Al, por la aparición del fenómeno de pitting. Este efecto produce también un descenso en la diferencia de potencial a aplicar, y por tanto, un menor coste energético. (Chen, 2004)

- **pH**

El pH inicial del agua a tratar, influye sobre el proceso de disolución del Al como especie coagulante y sobre el voltaje de la celda, siendo los valores extremos tanto ácidos como básicos los que suponen menores valores de voltaje de célula. Durante los procesos de EC, los valores de pH tienden a mantenerse cercanos al inicial, y en algunos casos la tendencia es que el pH de la disolución se desplaza hacia valores cercanos a la neutralidad, lo que supone una ventaja frente a la coagulación química.

- **Densidad de corriente (j)**

La densidad de corriente es el parámetro más importante en los tratamientos electroquímicos. La diferencia de potencial aumenta con j, por lo que valores bajos de j suponen menores valores del voltaje y mayores tiempos de tratamiento. (Chen, 2004)

- **Distancia interelectrónica**

La distancia entre los electrodos debe ser lo menor posible para minimizar la componente óhmica del sobre potencial, pero se debe optimizar para asegurar un buen comportamiento hidrodinámico del reactor que favorezca la transferencia de masa y que no aparezcan problemas por obturaciones si se forman espumas, etc.

Los reactores de EC para el tratamiento a escala industrial suelen estar diseñados para conseguir una buena relación entre el área total de electrodo y el volumen del reactor, con el objetivo de producir equipos más eficientes y con menores costes. De esta forma se maximiza el rendimiento del espacio y se pueden disminuir los tiempos de tratamiento. Por todo esto, los reactores se diseñan de forma que se utiliza un número elevado de electrodos que funcionan como cátodo y como ánodo (stack de electrodos), cuya conexión eléctrica se puede hacer de distintas formas: en modo bipolar o monopolar.

En el caso de las conexiones en modo bipolar de los electrodos, se consigue que circule la misma corriente por todos los electrodos, pero la diferencia de potencial que se debe aplicar a la celda es mayor. Por el contrario, al realizar la conexión en paralelo, la diferencia de potencial a aplicar es menor, pero la corriente se distribuye de forma distinta entre las celdas dependiendo de la resistencia interna de cada una. La geometría de los electrodos también es un factor importante, puesto que afecta a la densidad de corriente y a como se distribuye esta, a la caída óhmica y a la configuración final del reactor. La elección entre estas opciones al diseñar un reactor EC depende de parámetros como el caudal de agua residual a tratar, la carga contaminante, el espacio disponible

o el tipo de fuente de corriente a utilizar (fuente continua, energía renovable), entre otros (Mollah, 2001).

Los reactores pueden funcionar bajo dos modos generales de reacción: batch y en continuo. En modo batch se trabaja por lotes: se introduce un volumen del efluente, se aplica el tratamiento y al finalizar se vacía el efluente tratado y se vuelve a llenar al reactor para tratar otro volumen de agua. Al trabajar en continuo, el líquido entra al reactor, lo recorre recibiendo el tratamiento y sale por otro punto. En el modo de operación en continuo se debe optimizar el caudal y el área electródica para que el tiempo de residencia del líquido dentro del reactor sea suficiente para recibir el tratamiento completo en un solo paso.

#### **2.4.4.5. Reactores para la Electrocoagulación**

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar.

Analizando el reactor tipo batch, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas,

Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso, a saber: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que

separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación. (MarcadorDePosición1)

La separación por sedimentación es la más común. La densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas. Se ha podido observar de la experimentación que a bajas corrientes se producen bajas densidades de burbujas, obteniéndose un bajo flux de momentum hacia arriba que hace que predomine la sedimentación sobre la flotación. Situación contraria se presenta cuando se aumenta la corriente, pues la densidad de burbujas aumenta resultando en un aumento del flux de momentum hacia arriba, favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes.

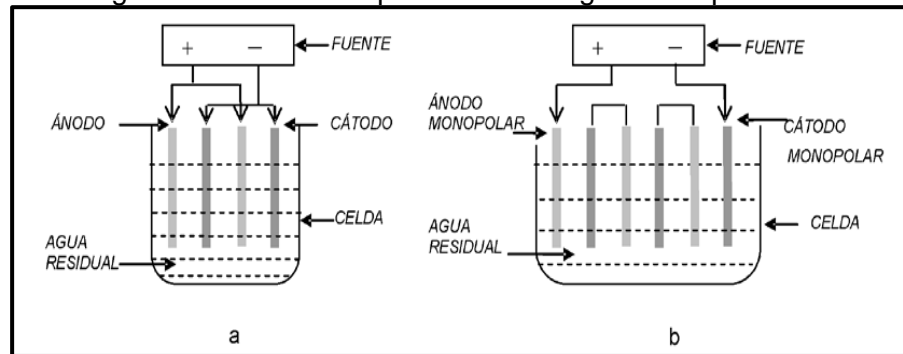
Los procesos que utilizan sólo coagulación pueden combinarse con otras tecnologías para lograr la separación del contaminante. Estas tecnologías pueden ser: flotación por aire disuelto, electroflotación, filtración y clarificación.

Estas combinaciones de técnicas de separación con el proceso de electrocoagulación se pueden llevar a cabo integrando ambas tecnologías en el diseño del reactor o se pueden presentar en unidades separadas. Es importante señalar que la combinación de estas tecnologías y su diseño dependen en gran medida de las propiedades y características que tenga el agua residual a tratar y sus contaminantes. Es, además, importante considerar el uso del efluente. (MarcadorDePosición1)

Se ha observado que cuando en el reactor se usan dos placas, una como ánodo y otra como cátodo, no se presenta una buena

disolución de iones metálicos. Para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar como se muestra en la figura 8.

Figura 2.8. Reactores para electrocoagulación tipo batch:

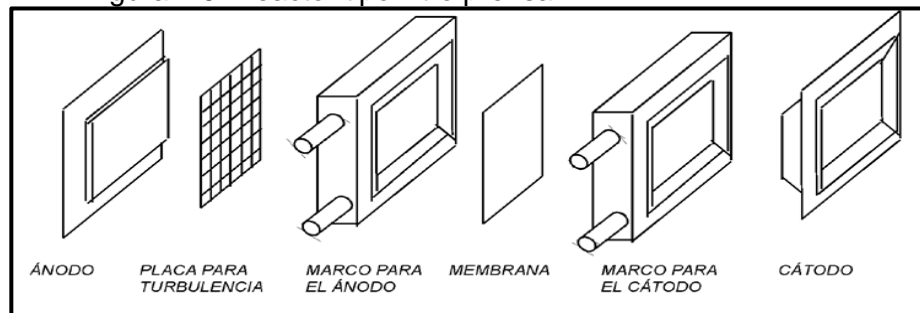


Fuente: (Mollah, 2001)

Existen otros tipos de reactores para la electrocoagulación. Uno de ellos es el tipo filtro prensa, constituido por un par de marcos. Uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara como se muestra en la figura 2.9.

El agua a ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo turbulento, para incrementar la eficiencia del proceso. Este sistema hace que su operación y mantenimiento sean relativamente simples.

Figura 2.9. Reactor tipo filtro prensa



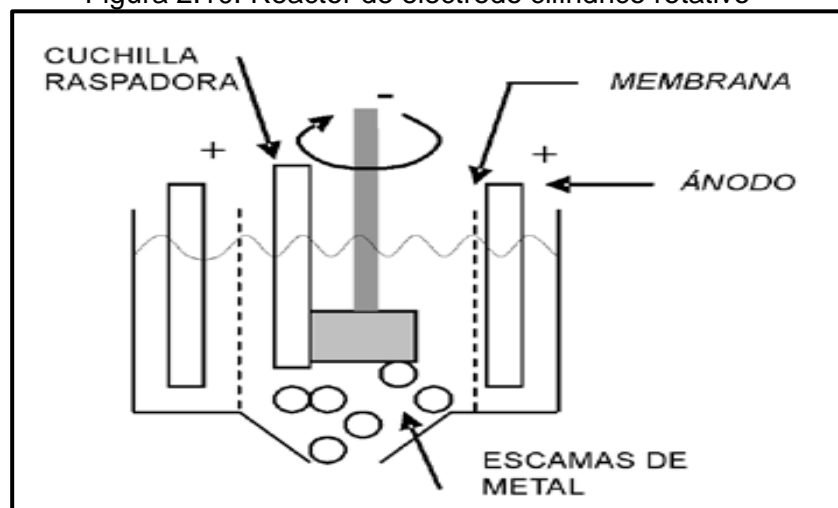
Fuente: (Mollah, 2001)

Para la remoción de metales se usa el reactor de electrodo cilíndrico rotativo, en el cual el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo, como se muestra en la figura. (Mollah, 2001)

Esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo. Finalmente, también es usado para la remoción de metales el reactor de lecho fluidizado, mostrado en la figura 2.10.

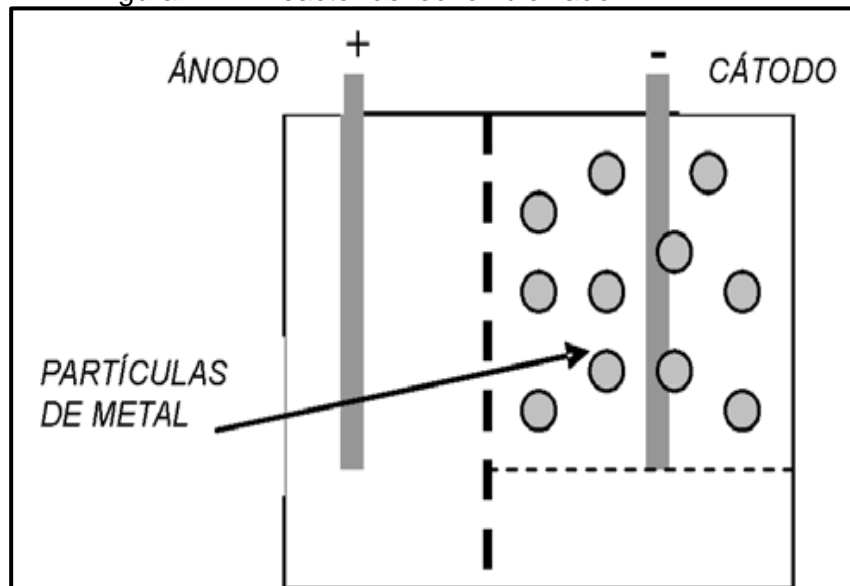
Éste permite aumentar el área específica superficial, mejorando la eficiencia del proceso.

Figura 2.10. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo



Fuente: (Mollah, 2001)

Figura 2.11. Reactor de lecho fluidizado



Fuente: (Mollah, 2001)

Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables, por ejemplo como el acero que se utiliza en los reactores para la recuperación de metales. Los electrodos más modernos son fabricados de titanio con una pequeña capa de óxidos de metales nobles. Sin embargo, el material más comúnmente utilizado es el aluminio. El cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio.

#### 2.4.5. Estándares de Calidad Ambiental

La aprobación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el agua tiene el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representan riesgos significativos para la salud de las personas ni para el ambiente. Los estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado



natural y son obligatorios en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Por ellos se establecieron estándares de calidad ambiental del agua, límites máximos permisibles y valores máximos admisibles las cuales presentare a continuación como medidas que fueron establecidas en normas ambientales. (MINAM, 2010)

- **CONCENTRACION ESTABLECIDA POR OTROS PAISES DE LA REGION O GUIAS INTERNACIONALES**

La Ley General de Aguas establece como valor límite de 15 mg/l, de DBO, para Aguas destinadas al riego de vegetales de Consumo Crudo y bebida de animales, correspondiente a la clase III. El Anteproyecto de Norma de Calidad para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales de Chile, establece como valor límite de 5 mg/l para el DBO, en aguas destinadas para el riego irrestricto. La Norma para prevenir la Contaminación Ambiental de Paraguay, establece como concentración máxima de 10 mg/l de DBO, en aguas destinadas para el riego de hortalizas o plantas frutícolas u otros cultivos destinados al consumo humano en forma natural. (OMS, 1993)

- **ANALISIS O SUSTENTO DE PROPUESTA NACIONAL**

Se establece una concentración de 15 mg/l para el DBO, para aguas destinadas al riego de vegetales este valor guarda concordancia con lo que establece la Ley General de Aguas en su clase III, correspondiente a aguas para riego de vegetales de Consumo Crudo y bebidas de animales.

Tabla 2.9. ECAS Nacionales

Parámetros	CATEGORIA 1		CATEGORIA 3	
	Aguas superficiales destinadas para recreación		Riego de vegetales	
	Contacto primario	Contacto secundario	Vegetales tallo bajo	Vegetales tallo alto
<b>CF (NMP/100 mL)</b>	200	1000	1000	2000
<b>DBO5 (mg/L)</b>	5	10	15	15

Fuente. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Agua

Tabla 2.10. A nivel internacional los Estándares de calidad ambiental

COMPARACION ENTRE LA OMS Y LA EU		
Parámetros	Estándares de la OMS	Estándares Europeos
Solidos suspendido	NO hay directriz	No se menciona
DQO	NO hay directriz	No se menciona
DBO	NO hay directriz	No se menciona
Oxidabilidad		5,0 mg/l O <sub>2</sub>
Grasas/aceites	NO hay directriz	No se menciona
Turbidez	NO hay directriz	No se menciona
pH	NO hay directriz	No se menciona
Color	NO hay directriz	No se menciona
Oxígeno disuelto	NO hay directriz	No se menciona
Dureza	NO hay directriz	No se menciona

Fuente: (OMS, 1993)

#### **2.4.5.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)**

DQO es la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica e inorgánica en el agua expresada en mg/L y se emplea un oxidante (dicromato potásico) que se determina en tres horas y, en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. Sin embargo la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales, el valor de la DQO es mayor que el de la DBO<sub>5</sub>. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO<sub>5</sub> porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente, y su contenido es de materia orgánica: es de carbohidratos, proteínas, grasas e inorgánico (hierro ferroso, nitritos, amoníaco, sulfuros y cloruros) (MINAM, 2010).

#### **CARACTERÍSTICAS:**

- El ensayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. En el ensayo, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse.
- El ensayo de la DQO también se emplea para la medición de la materia orgánica presente en aguas residuales tanto industriales como municipales que tengan compuestos tóxicos para la vida biológica. La DQO de un agua residual suele ser mayor que su correspondiente DBO, siendo esto debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica.

- En muchos tipos de aguas residuales es posible establecer una relación entre los valores de la DBO y la DQO. Ello puede resultar de gran utilidad dado que es posible determinar la DQO en un tiempo de 3 horas, frente a los 5 días necesarios para determinar la DBO. Una vez establecida la correlación entre ambos parámetros, pueden emplearse las medidas de la DQO para el funcionamiento y control de las plantas de tratamiento. Desventaja de la DQO.
- En general, en una muestra hay compuestos orgánicos que, aunque son oxidados por el dicromato de potasio no son biodegradables y, por lo tanto, no son oxidados al ser descargados en un río, normalmente la DQO sobreestima el monto de oxígeno que se utilizaría en un río.
- La DQO, no entrega ninguna información acerca de la tasa a la cual va a ocurrir la oxidación bioquímica en el curso receptor.

#### **MÉTODO DE ANÁLISIS:**

Se prefiere el método de dicromato a los procedimientos que utilizan otros oxidantes debido a su mayor capacidad oxidante, a su aplicabilidad, a una mayor variedad de muestras y a su fácil manipulación.

#### **CONCENTRACIONES ESTABLECIDAS POR GUIAS INTERNACIONALES**

A1: Honduras a establecido concentraciones según la clase III (A) valores de 10 mg/L A2: según la norma hondureña la concentraciones aceptables de 20 mg/L A3: para la CEE considera valores de 30mg/L B1: la legislación hondureña recomienda concentraciones de 30 mg/L B2: para contacto secundario la norma hondureña establece 50 mg/L.

#### **2.4.5.2. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO(DBO5)**

Dado que la materia orgánica no sólo son carbohidratos, una manera más práctica de analizar el consumo de oxígeno en la degradación de la materia orgánica en general, es medir los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) La DBO5 expresan la materia orgánica en términos generales, pero no indican su composición, la cual es muy variada. Como su origen proviene de organismos, y sus productos de degradación o de metabolismo, se puede afirmar que la componen proteínas, carbohidratos y lípidos y/o sus productos de degradación: aminoácidos, monosacáridos, hidrocarburos, ácidos grasos, alcoholes, más otros componentes propios de los vegetales como pigmentos DBO: Es el parámetro de contaminación orgánica. Es el resultado de la degradación de tres tipos de materiales: materiales orgánicos carbónicos (microorganismos aerobios), nitrógeno oxidable (nitrosomas y nictrobacter), compuestos químicos reductores (se oxidan con el OD) (MINAM, 2010).

#### **CARACTERÍSTICAS:**

Los resultados de los ensayos de DBO se emplea para:

1. Determina la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente;
  2. Dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales;
  3. Medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento y
  4. Controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos.
- El período de incubación es, normalmente, de 5 días a 20°C, aunque también se pueden adoptar diferentes periodos de tiempo y temperatura.

- La medición del oxígeno disuelto se hace antes y después del período de incubación.
- La oxidación es un proceso lento. En un período de 20 días se completa la oxidación del 95 al 99% de la materia carbonosa, y en los 5 días que dura el ensayo de la DBO se llega a oxidar entre el 60 y el 70%
- La determinación de la DBO5 está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.
- Se define la DBO5 como el monto de oxígeno consumido por microorganismos para oxidar biológicamente la materia orgánica, cuando se incuba una muestra en la oscuridad durante 5 días a 20°C.

### **RIESGOS**

La demanda bioquímica de oxígeno es un indicador de consumo de oxígeno por microorganismo, el consumo de esta agua con alto contenido de DBO5 presenta riesgos a la salud.

### **MÉTODO DE ANÁLISIS**

Se determina DBO5 con la prueba de DBO de 5 días, límite mínimo detectable es  $< 2\text{mg}/\text{LO}_2$ .

### **CONCENTRACIONES ESTABLECIDAS POR GUIAS INTERNACIONALES**

A1: Según la legislación de Brasil para aguas dulces para abastecimientos de consumo humano con tratamiento simplificado se establece valores aceptables para DBO de  $3\text{ mgO}_2/\text{L}$ , y en Ecuador sus valores de concentración son de  $2\text{ mgO}_2/\text{L}$ , para la CEE recomienda

B1: según la legislación brasileña recomienda concentraciones para aguas dulces  $3\text{ mg}/\text{L}$ , para Honduras  $10\text{ mg}/\text{L}$

B2: la norma hondureña recomienda para contacto indirecto  $15\text{ mg}/\text{L}$ , para Brasil recomienda  $10\text{ mgO}_2/\text{L}$  para aguas dulce para contacto secundario.

### **ANALISIS O PROPUESTA NACIONAL.**

A1: La DBO es la cantidad de oxígeno consumido por microorganismo para la degradación biológica en un medio aeróbico de la materia orgánica un medio aeróbico, a mayor cantidad de materia orgánica mayor contenido de microorganismos en una muestra de agua por lo que se recomienda bajas concentraciones. Algunas legislaciones recomiendan DBO5 de 3 mgO<sub>2</sub>/L.

A2: se recomienda concentración aceptable entre 5 mgO<sub>2</sub>/L y 10 mgO<sub>2</sub>/L para aguas dulces.

A3: concentraciones aceptables.

## CAPÍTULO III

### 3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

#### 3.1. Metodología

##### 3.1.1. Armado del panel solar

Se buscó un lugar donde caigan más rayos solares, este caso en la provincia de Concepción - Junín se conectó el inversor al panel de tal manera que se conectó los cables de corriente directa de los paneles solares al inversor, asegurándose que la polaridad sea la correcta. El cable recomendado para la máxima salida es 8AWG (medida estándar del) o cables que puedan conducir más de 30 amperes. La longitud optima del cable debe ser menor a 8 metros por que cables de mayor longitud experimentan caídas de voltaje significativas en el rango de salida de potencia de los paneles solares es de 12 voltios para este tipo de trabajo.

Se coloca el switch de voltaje del inversor victron de 180 W en la posición correcta (115V o 230V) de acuerdo al voltaje de la línea eléctrica, se conecte el cable de corriente alterna al inversor y conecta a la batería( en este caso se utilizó una batería de plomo, son parecidos a los que se usan en autos y camiones, pero son



optimizadas para una aplicación diferente, Estas baterías de tipo ciclo profundo tienen capas de plomo gruesas que además brindan la ventaja de significativamente prolongar su vida. Estas baterías son relativamente grandes y pesadas por el plomo. Son compuestas de celdas de 2 voltios nominales que se juntan en serie para lograr baterías de 6, 12 o más voltios. Los indicadores comenzaran a parpadear de izquierda a derecha cuando sea detectada la corriente de la línea eléctrica y de la línea de corriente directa. Esto indica que el inversor está trabajando en forma normal. La velocidad de parpadeo será de acuerdo a la potencia recibida de los paneles solares. Si no se detecta corriente alterna en la línea CFE entonces se encenderá la luz roja y el inversor no transmitirá potencia a la línea eléctrica casera. Esto se llama “protección de isla”, la batería es la cual permite el almacenamiento de la energía que se produce durante el día con la radiación solar para ser utilizada en la noche o durante periodos prolongados de mal tiempo o con poca radiación solar. Además el uso de baterías permite poder inyectar una intensidad de corriente superior a la que los propios paneles solares puedan entregar, si la instalación interior de la vivienda lo requiere. Para terminar de unir al conversor y así empezar a dar energía a nuestro proceso, Los tipos de baterías más recomendadas para uso en instalaciones fotovoltaicas son las de tipo estacionarias de plomo ácido y de placa tubular, compuestas de un conjunto de vasos electroquímicos interconectados de 2V cada uno, que se dispondrán en serie y/o paralelo para completar los 12, 24 o 48 V de tensión de suministro y la capacidad de corriente en continua que sea adecuado en cada caso.

**Figura 3.1. Montaje del panel solar**



### **3.1.2. Diseño y construcción de la celda de electrocoagulación**

- **Dimensionamiento de la celda.**

El dimensionamiento de la celda es basado en un sistema que opera como un reactor tipo Bach a escala laboratorio con capacidad de tratar 1.5 litros de agua residual. El material usado para la fabricación de la celda fue acrílico transparente, de forma de un paralelepípedo rectangular, en el cual están sumergidos los electrodos que son de aluminio y fierro de forma cuadrada.

Estos electrodos están conectados a una fuente de poder la cual suministra la corriente para el proceso de electrocoagulación, en una primera etapa se utilizó una fuente de poder de voltaje constante, mientras que en las pruebas definitivas se utilizó una fuente de poder de voltaje y amperaje variable, permitiendo modificar el suministro de corriente que se le proporciona a la celda.

- **Celda de electrocoagulación**

La celda de electrocoagulación o cuba electrolítica fue diseñada para tratar

1.5 litros de efluente, el material seleccionado fue acrílico transparente de tal forma que nos permita apreciar con claridad todos los procesos físico químicos de agua que se presentan en el proceso de electrocoagulación.

Se tuvo el criterio desde el inicio de fabricarla totalmente desarmable, para eso se fabricaron soportes de acrílico para los electrodos de tal manera que se pudiera variar los espaciamientos entre las placas y realizar una mejor limpieza de la celda después de cada prueba.

La celda es de forma de un paralelepípedo rectangular con las siguientes dimensiones:

Ancho = 20 cm Largo = 15 cm y Altura= 20 cm.

El agua residual se llenó hasta una altura de 15 cm dejando un espacio libre de 5 cm para la acumulación de lodos en la parte superior. La celda se diseñó con un criterio de generar 3 zonas principales las cuales se les denominó de la siguiente manera:

**Zona de reacción:** donde están sumergidos los electrodos y se produce el proceso de electrocoagulación.

**Zona de Sedimentación:** donde precipitan los lodos sedimentables.

**Zona de Flotación:** donde se acumulan los lodos productos de la flotación.

Adicionalmente a esto se instaló un tomador de muestra, para esto se prefirió utilizar un caño de plástico el cual permita tomar más fácilmente las muestras a analizar, como se aprecia en la

**figura 3.2**

Figura 3.2. Celda de electrocoagulación

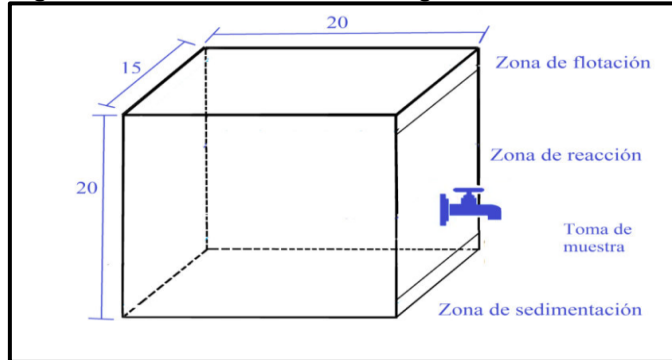
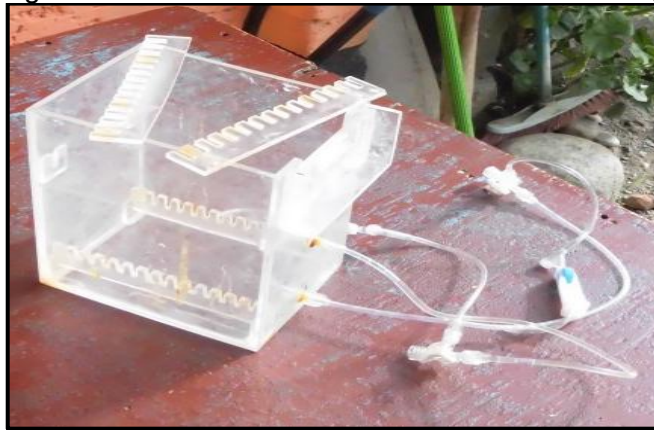


Figura 3.3. Dimensiones de la celda de electrocoagulación



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4. Colocación de electrodos de fierro y aluminio.

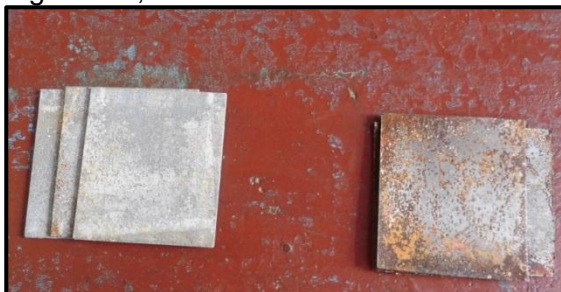


- **Electrodos**

Los materiales utilizados como electrodos fueron aluminio y fierro, esto se decidió consultando la bibliografía y basándose en estudios anteriores los cuales indican se obtienen muy buenos resultados, además que no son muy costosos y fáciles de conseguir. Las dimensiones de los electrodos fueron de 10 cm de largo y 10 cm de ancho, de forma cuadrada.

Para determinar el espaciamiento entre las placas de aluminio y fierro, se hicieron pruebas a diversos espaciamientos de 5mm, 10mm, y 20mm, obteniéndose mejores resultados en una distancia de 10 mm, la cual fue asumida para las pruebas definitivas. Se utilizaron un total de 10 placas metálicas como electrodos, 5 de aluminio y 5 de fierro, tomando al aluminio como ánodo (electrodo de sacrificio) y el fierro como cátodo.

Figura 3.5, Electrodos de sacrificio.



- **Fuente de poder**

La fuente de poder utilizada en las pruebas definitivas nos permitió regular la cantidad de corriente suministrada a la celda para el proceso de electrocoagulación, esta tenía una capacidad de suministrar hasta 12 amperios y un voltaje de 0 a 30 V, los cuales se podrían monitorear con medidores digitales de amperaje y voltaje.

Para el suministro de corriente continua a los electrodos se utilizaron cables de uso eléctrico y cocodrilos para conectarlos

a las placas de fierro y aluminio. En la figura 17 y 18 se observan un diagrama del sistema de electrocoagulación y el equipo utilizado en laboratorio.

Figura 3.6. Diagrama de equipo de electrocoagulación

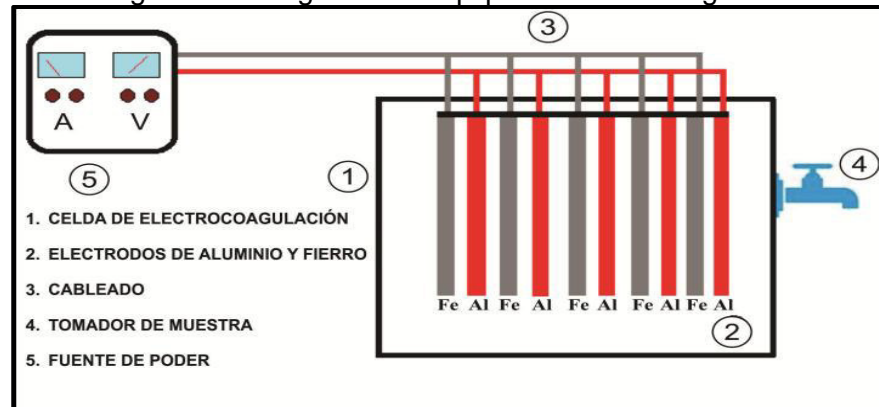


Figura 3.7. Equipo de electrocoagulación.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3. Pruebas Experimentales

El trabajo se desarrolló en el distrito de Concepción, provincia de Concepción, utilizando un equipo de electrocoagulación alimentado de energía solar fotovoltaica el cual permitió controlar las variables independientes en la remoción de DBO y DQO.

El tratamiento experimental en el cual se dividieron las muestras en grupos, tal como se muestra en el diseño experimental ( $3^2 = 9$ , tres niveles, dos variables independientes) variando en este caso el voltaje y los centímetros de separación de electrodos.

En el primer tratamiento se tomó 1.5 L de la muestra de lactosuero y se inició el proceso de electrocoagulación tomando la distancia inicial de 1 cm, a tres diferentes voltios de muestreo (2.5, 5 y 10), en el cual se determinara la distancia y voltio óptimo de recuperación máxima de DBO y DQO.

En el segundo tratamiento se tomó 1.5 L de la muestra de lactosuero y se inició el proceso de electrocoagulación tomando la distancia inicial de 3 cm, a tres diferentes voltios de muestreo (2.5, 5 y 10), en el cual se determinara la distancia y voltio óptimo de recuperación máxima de DBO y DQO.

En el tercer tratamiento se tomó 1.5 L de la muestra de lactosuero y se inició el proceso de electrocoagulación tomando la distancia inicial de 6 cm, a tres diferentes voltios de muestreo (2.5, 5 y 10), en el cual se determinara la distancia y voltio óptimo de recuperación máxima de DBO y DQO.

Estos tratamientos se realizaron con una repetición para tener mayor precisión, lo cual nos permitirá una mejor discusión de resultados.

Se pasó a retirar los electrodos con los que se trabajó, y luego a retirar los compuestos electrocoagulados los cuales se extendieron en toda la superficie, utilizando una paleta.

Una vez retirado la capa electrocoagulada se dejó en reposo por un tiempo de 20 min. Para que los sólidos suspendidos se sedimenten o precipiten.

Terminada esta fase se procedió a la respectiva recolección de datos referido a la concentración de fosforo en el lactosuero

ácido residual, la cual se determinará mediante técnica de Reflujo cerrado colorimétrico, además se determinará el voltaje y la distancia entre electrodos óptimos para un mejor porcentaje de remoción de DBO y DQO mediante el proceso de electrocoagulación.

A continuación desde la figura 19 a la 24 podemos observar todo el proceso de tratamiento del efluente con el equipo de electrocoagulación, evidenciando el buen rendimiento en la remoción de contaminantes.

Figura 3.8. Lactosuero inicial



Figura 3.9. A 2.5 voltios.





Figura 3.10. A 5 voltios



Figura 3.11. A 10 voltios



Figura 3.12. Extracción de lodos.



Figura 3.13. Efluente final



#### **3.1.4. Tipo de la Investigación**

El tipo de investigación es experimental; para analizar el efecto producido por la acción o manipulación de las variables independientes (voltaje y separación de electrodos) sobre la variable dependiente (carga orgánica).

#### **3.1.5. Nivel de la Investigación**

El nivel de investigación es correlacional, tiene como finalidad establecer el grado de relación o asociación no causal existente entre dos o más variables. Se caracteriza porque primero se mide las variables y luego, mediante pruebas de hipótesis correlacionales y la aplicación de técnicas estadísticas, se estima la correlación.

### **3.2. Diseño de la Investigación.**

El diseño experimental utilizado en la investigación es un diseño experimental de tipo factorial ( $3^2 = 9$  por dos variables nos da un total de 18 experimentos; donde existen 2 factores o variables independientes y 3 niveles de los factores), en el cual se estimaran los efectos de 2 factores experimentales que son el voltaje y separación de electrodos sobre la variable dependiente (carga orgánica).

Como se muestra en el diseño se tendrá 9 experimentos por cada tipo de indicador, los mismos que tendrán 1 repetición. Por lo que se tendrá un total de 36 experimentos.

Tabla 3.1. Diseño factorial codificada y real.

N° PRUEBAS	CODIFICADO		REAL	
	X1	X2	Voltaje (V)	cm
1	1+	1+	2,5	1
2	0	1+	5	1
3	1-	1+	10	1
4	1+	0	2,5	3
5	0	0	5	3
6	1-	0	10	3
7	1+	1-	2,5	6
8	0	1-	5	6
9	1-	1-	10	6

### 3.3. Hipótesis de la Investigación

#### 3.3.1. Hipótesis General

Es eficiente la variación del voltaje y separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.

#### 3.3.2. Hipótesis Específicas

- ✓ Las características fisicoquímicas que presenta el lactosuero sobrepasan los Estándares de Calidad Ambiental.
- ✓ La variación del voltaje influye significativamente en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.
- ✓ El efecto de la variación de la separación de electrodos no afecta en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual.

- ✓ La eficiencia de la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación con un sistema fotovoltaico para el tratamiento del lactosuero residual es de un 95%.

### **3.4. Variables**

#### **3.4.1. Variable Independiente**

- Voltaje
- Separación de electrodos

#### **Indicadores**

- Voltios (V)
- Centímetros (cm)

#### **3.4.2. Variable Dependiente**

- Carga orgánica

### **3.5. Cobertura del Estudio.**

#### **3.5.1. Universo.**

Lactosuero acido residual de los productos lácteos elaborados en el distrito de Apata- Junín

#### **3.5.2. Población.**

Con un tamaño de muestra aproximado ( $n^\circ$ ) de 1,5 litros, valor de significancia ( $Z\alpha$ ) del 0,5367, y un error de tolerancia de investigación o precisión del 10% y un nivel de confianza del 85,27%, se define que la población es infinita.

#### **3.5.3. Muestra.**

El lactosuero acido residual de los productos lácteos elaborados en el distrito de Apata, en razón de 54 L para todo el análisis experimental y 1,5 L por experimento.

#### **3.5.4. Muestreo.**

Muestreo aleatorio simple, donde los elementos de la muestra se eligen al azar, directamente y en una sola etapa.

El muestreo aleatorio simple se aplica fundamentalmente en poblaciones pequeñas y plenamente identificables donde cada individuo de la población tiene las mismas posibilidades de ser seleccionado en la muestra.

### **3.6. Técnicas e Instrumentos**

#### **3.6.1. Técnicas de la Investigación.**

Observación de procesos experimentales según la manipulación de las variables, trabajos de investigación realizados con características semejantes, revistas y libros de investigación.

#### **3.6.2. Instrumentos de la Investigación.**

Los instrumentos de la investigación son los reportes de los procesos experimentados por el laboratorio correspondiente, los resúmenes de los trabajos de investigación, los reportes de campo.

### **3.7. Procesamiento estadístico de la información.**

#### **3.7.1. Estadísticos.**

Se utilizó un software estadístico denominado Minitab, para los análisis de medidas de dispersión, correlación de Pearson.

#### **3.7.2. Representación.**

Las representaciones de la parte experimental se dieron por medio de reportes de laboratorio y gráficas, las relaciones de variables mediante ecuaciones y los análisis estadísticos según el software estadístico desarrollado.

#### **3.7.3. Técnica de comprobación de la hipótesis.**

Para el trabajo de investigación se utilizó el análisis de varianza mediante un Anova de Fisher.

## CAPITULO IV

### 4. ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Resultados.

##### 4.1.1. Resultados de los Parámetros de las Pruebas Experimentales y sus Replicas

Tabla 4.1. Resultados de remocion de DQO a 1cm de distancia de electrodos

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Potencia (W)	Distancia de Electrodo (cm)	pH	DQO <sub>o</sub> (mg/L)	DQO <sub>f</sub> (mg/L)
3	2,5	10	25	1	4,2	1842	196,8
3	5	14	70	1	4,4	1842	108,7
3	10	25	250	1	4,3	1842	38,4

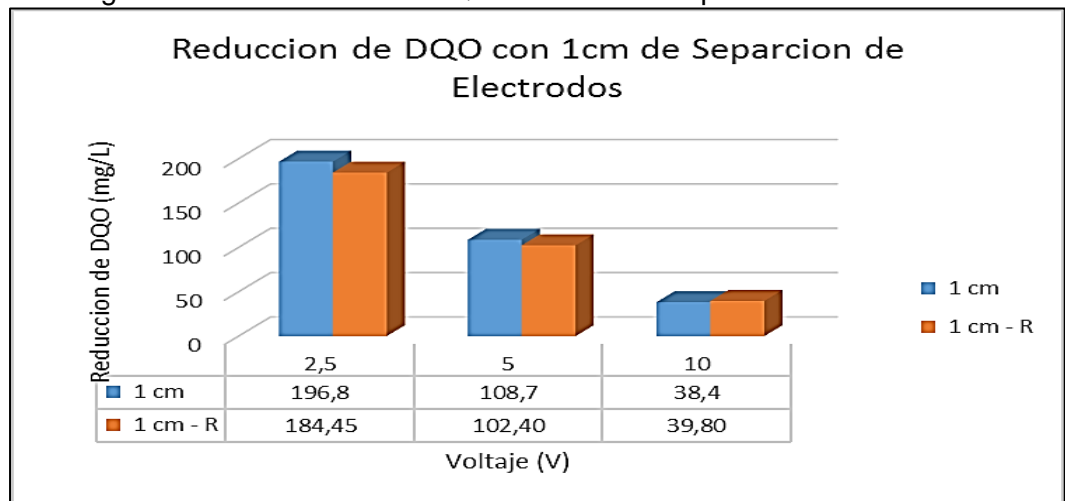
En la tabla 4.1 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la primera prueba experimental, tiempo de 3 horas, voltaje promedio de 5,8 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 16,3 amperios, potencia promedio 115 watts, distancia de electrodos a 1 cm, pH promedio 4,3 concentración inicial de DQO 1842 mg/L y con un DQO final de 38,4 mg/L.

Tabla 4.2. Resultados de remocion de DQO a 1cm de distancia de electrodos - Replica

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Potencia (W)	Distancia de Electrodo (cm)	pH	DQOo (mg/L)	DQOf (mg/L)
3	2,5	9	22,5	1	4,2	1757,90	184,45
3	5	13	65	1	4,3	1757,90	102,40
3	10	22	220	1	4,3	1757,90	39,80

En la tabla 4.2 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la réplica de la primera prueba experimental, tiempo de 3 horas, voltaje promedio de 5,8 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 14,6 amperios, potencia promedio 102,5 watts, distancia de electrodos 1 cm, pH promedio 4,2 concentración inicial de DQO 1757,90 mg/L y con un DQO final de 39,80 mg/L.

Figura 4.1. Reduccion de DQO con 1 cm de separacion de electrodos



En la figura 4.1 se observan los resultados del primer tratamiento con su respectiva réplica, a 1 cm de distancia, con un voltaje de 2,5, 5 y 10 voltios donde la reducción de DQO inicial es de 196,8 mg/L a 38,4 mg/L, no existiendo variaciones en los resultados por lo cual se obtendrá un promedio de cada punto experimental.

Tabla 4.3. Resultados de remocion de DQO a 3 cm de distancia de electrodos

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Potencia (W)	Distancia de Electrodo (cm)	pH	DQOo (mg/L)	DQOf (mg/L)
3	2,5	10	25	3	4,4	1782,3	179,24
3	5,0	15	75	3	4,3	1782,3	111,43
3	10,0	26	260	3	4,5	1782,3	81,9

En la tabla 4.3 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la segunda prueba experimental, tiempo de 3 horas, voltaje promedio de 5,8 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 17 amperios, potencia promedio 120 watts, distancia de electrodos a 3 cm, pH promedio 4,4 concentración inicial de DQO 1782,3 mg/L y con un DQO final de 81,9 mg/L.

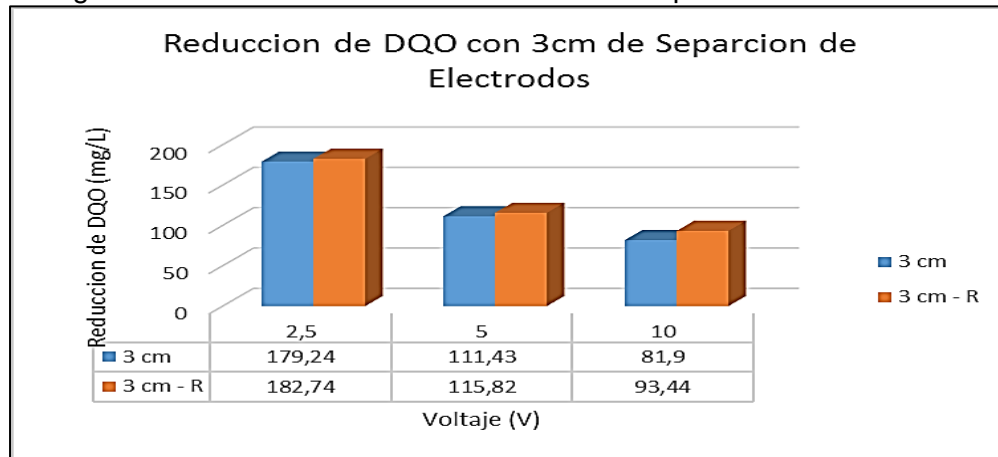
Tabla 4.4. Resultados de remocion de DQO a 3 cm de distancia de electrodos - Replica

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Potencia (W)	Distancia de Electrodo (cm)	pH	DQOo (mg/L)	DQOf (mg/L)
3	2,5	12	30	3	4,5	1652,1	182,74
3	5	14	70	3	4,2	1652,1	115,82
3	10	24	240	3	4,5	1652,1	93,44

En la tabla 4.4 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la réplica de la segunda prueba experimental, tiempo de 3 horas, voltaje promedio de 5,8 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 16,6 amperios, potencia promedio 113,3 watts, distancia de electrodos 3 cm, pH promedio 4,3 concentración inicial de DQO 1652,1 mg/L y con un DQO final de 93,44 mg/L.



Figura 4.2. Reduccion de DQO con 3 cm de separacion de electrodos



En la figura 4.2 se observan los resultados del segundo tratamiento con su respectiva réplica, a 3 cm de distancia, con un voltaje de 2,5, 5 y 10 voltios donde la reducción de DQO inicial es de 179,24 mg/L a 81,9 mg/L, y la reducción de la réplica es de DQO inicial 182,74 mg/L a 93,44 mg/L, no existiendo variaciones en los resultados por lo cual se obtendrá un promedio de cada punto experimental.

Tabla 4.5. Resultados de remocion de DQO a 6 cm de distancia de electrodos

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Potencia (W)	Distancia de Electrodo (cm)	pH	DQOo (mg/L)	DQOf (mg/L)
3	2,5	11	27,5	6	4,3	1708,6	293,41
3	5	14	70	6	4,3	1708,6	251,2
3	10	25	250	6	4,5	1708,6	184,17

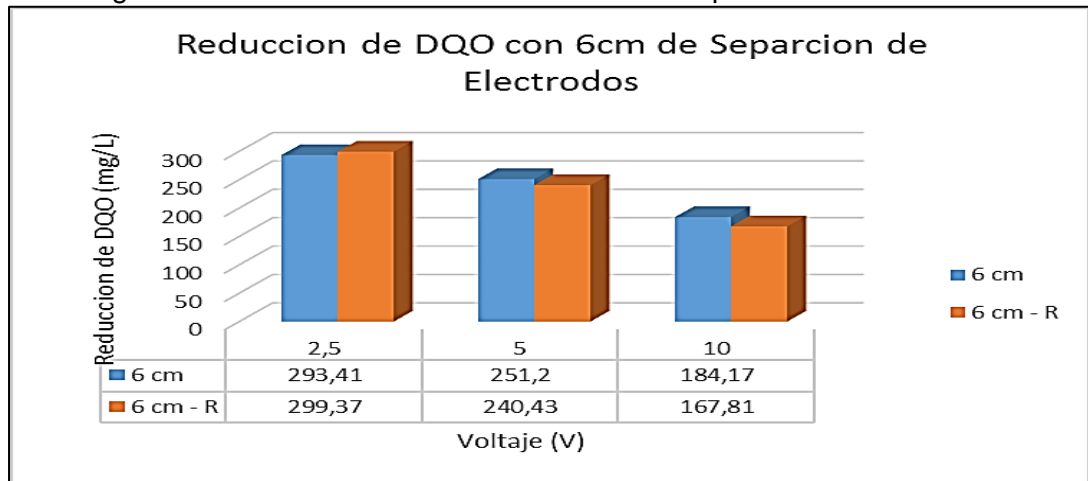
En la tabla 4.5 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la tercera prueba experimental, tiempo de 3 horas, voltaje promedio de 5,8 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 16,6 amperios, potencia promedio 115,8 watts, distancia de electrodos a 6 cm, pH promedio 4,3 concentración inicial de DQO 1708,6 mg/L y con un DQO final de 184,17 mg/L.

Tabla 4.6. Resultados de remocion de DQO a 6 cm de distancia - Replica

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Potencia (W)	Distancia de Electrodo (cm)	pH	DQO <sub>o</sub> (mg/L)	DQO <sub>f</sub> (mg/L)
3	2,5	12	30	6	4,4	1654,8	299,37
3	5	16	80	6	4,6	1654,8	240,43
3	10	26	260	6	4,2	1654,8	167,81

En la tabla 4.6 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la réplica de la tercera prueba experimental, tiempo de 3 horas, voltaje promedio de 5,8 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 18 amperios, potencia promedio 116,6 watts, distancia de electrodos 6 cm, pH promedio 4,4 concentración inicial de DQO 1654,8 mg/L y con un DQO final de 167,81 mg/L.

Figura 4.3. Reduccion de DQO con 6 cm de separacion de electrodos



En la figura 4.3 se observan los resultados del tercer tratamiento con su respectiva réplica, a 6 cm de distancia, con un voltaje de 2,5, 5 y 10 voltios donde la reducción de DQO inicial es de 293,41 mg/L a 184,17 mg/L, y la reducción de la réplica es de DQO inicial 299,37 mg/L a 167,81 mg/L, no existiendo variaciones en los resultados por lo cual se obtendrá un promedio de cada punto experimental.

#### 4.1.2. Resultados Promedios de las Pruebas Experimentales de DQO

Tabla 4.7.,. Resultados Promedio de Remoción 1 cm de distancia de electrodos y % de Remoción de DQO

<b>Voltaje (V)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DQO-R (mg/L)</b>	<b>DQO Prom (mg/L)</b>	<b>% de Remoción de DQO</b>
2,5	196,80	184,45	190,63	89,41%
5	108,70	102,40	105,55	94,14%
10	38,40	39,80	39,10	97,83%

En la tabla 4.7 se observan los resultados del promedio de remoción y porcentaje de DQO con una distancia de electrodos de 1 cm y un voltaje de 2,5, 5 y 10 voltios, teniendo como promedio inicial 190,63 mg/L y promedio final 39,10 mg/L. Con un porcentaje de remoción de 97,83%.

Tabla 4.8. Resultados Promedio de Remoción 3 cm de distancia de electrodos y % de Remoción de DQO

<b>Voltaje (V)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DQO-R (mg/L)</b>	<b>DQO Prom (mg/L)</b>	<b>% de Remoción de DQO</b>
2,5	179,24	182,74	180,99	89,46%
5	111,43	115,82	113,63	93,38%
10	81,90	93,44	87,67	94,89%

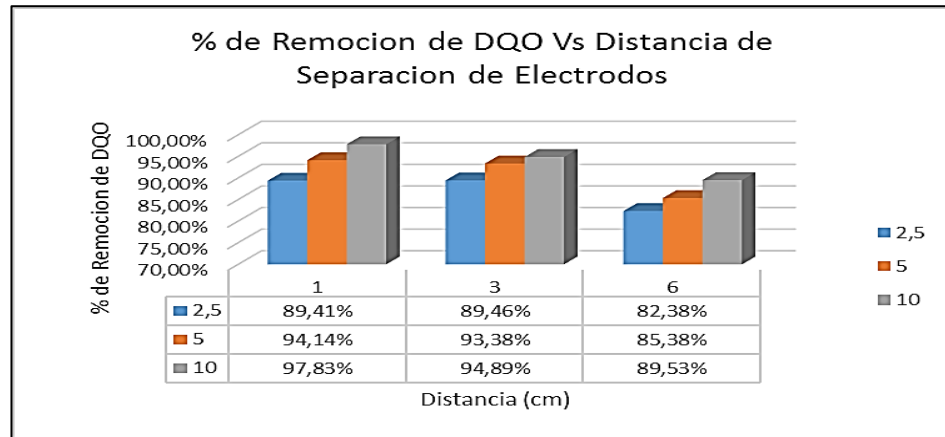
En la tabla 4.8 se observan los resultados del promedio de remoción y porcentaje de DQO con una distancia de electrodos de 3 cm y un voltaje de 2,5, 5 y 10 voltios, teniendo como promedio inicial 180,99 mg/L y promedio final 87,44 mg/L. Con un porcentaje de remoción de 94,89%.

Tabla 4.9. Resultados Promedio de Remoción 6 cm de distancia de electrodos y % de Remoción de DQO

Voltaje (V)	DQO (mg/L)	DQO-R (mg/L)	DQO Prom (mg/L)	% de Remoción de DQO
2,5	179,24	182,74	180,99	89,46%
5	111,43	115,82	113,63	93,38%
10	81,90	93,44	87,67	94,89%

En la tabla 4.9 se observan los resultados del promedio de remoción y porcentaje de DQO con una distancia de electrodos de 6 cm y un voltaje de 2,5, 5 y 10 voltios, teniendo como promedio inicial 180,99 mg/L y promedio final 87,44 mg/L. Con un porcentaje de remoción de 94,89%.

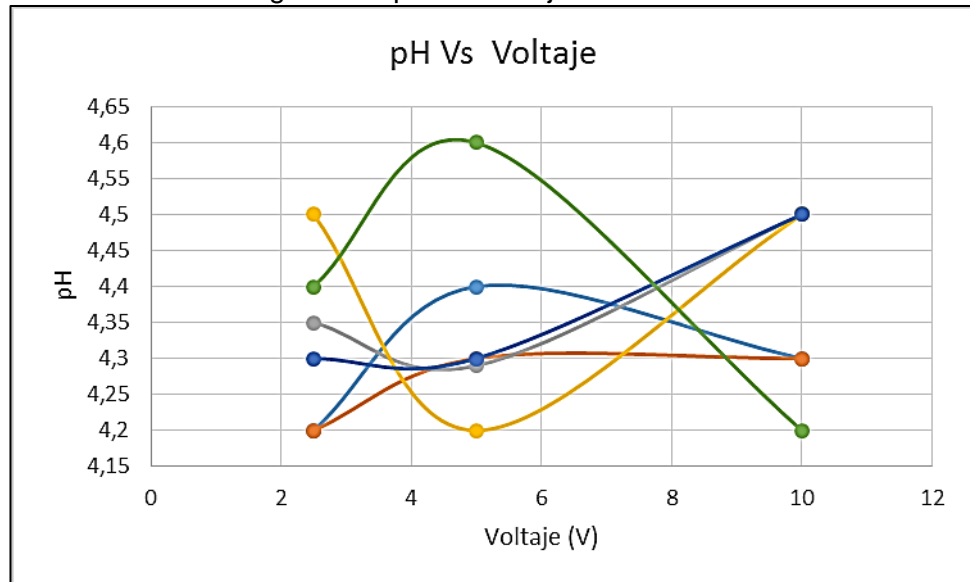
Figura 4.4. % de Remocion de DQO Vs Distancia de Separacion de Electrodo



En la figura 4.4 se observan los resultados del porcentaje de remoción vs la distancia de separación de electrodos, para 2,5 voltios a 1cm de distancia, con un valor inicial de 89,41% y un valor final de 82,38%; para 5 voltios con 3 cm de distancia, con un valor inicial de 94,14% y un valor final de 85,38%; para 10 voltios con 6 cm de distancia, con un valor inicial de 97,83% y un valor final de 89,53%. Encontrando la mayor porcentaje de remoción de

DQO en el tratamiento experimental de 10 voltios con 1 cm de distancia de electrodos.

Figura 4.5. pH Vs Voltaje



En la figura 4.6 se observó que el pH es constante en cada prueba experimental ya que la diferencia es mínima.

## 4.2. Discusión de Resultados

### 4.2.1. Cálculo de la Potencia y de la Eficiencia del Panel Fotovoltaico

Cálculos para la conexión interna del panel fotovoltaico. Se cuenta con las siguientes especificaciones de la celda fotovoltaica (Ver el grafico 4.4):

- Voltaje de circuito abierto de una celda:  $V_{oc}^1 = 0,52V_{cc}$
- Intensidad de corriente de salida de una celda:  $I_{sc}^1 = 4A$
- Número indefinido de celdas instalados en serie:  $n_s = 32$
- Número indefinido de celdas instalado en paralelo:  $n_p = 2$

Remplazar en la siguiente ecuación, y determinar el voltaje de circuito abierto del panel fotovoltaico

$$V_{oc} = V_{oc}^1 \times n_s \quad (1)$$

$$V_{oc} = 0,52V_{cc} \times 32$$

$$V_{oc} = 16,64V_{cc}$$

Tabla 4.10 Arreglo interno del Panel Fotovoltaico



Fuente: Elaboración propia

Determinar la intensidad del panel

$$I_{SC} = I_{SC}^1 \times n_p \quad (4.14)$$

$$I_{SC} = 4A \times 2$$

$$I_{SC} = 8A$$

Hallar la potencia pico del panel fotovoltaico

$$W_p = V_{oc} \times I_{SC} \quad (4.15)$$

$$W_p = 16,64 \times 8$$

$$W_p = 133,12W \approx 130W$$

Hallar la eficiencia del panel

$$n_c = \frac{P_m}{G_T \times A_c} \quad (4.16)$$

$$n_c = \frac{130Wp}{1000 \frac{W}{m^2} \times 0,95m^2} \times 100\%$$

$$n_c = 13,68\%$$

Para determinar la potencia hay que sumar la potencia total por unidad que consume y resultara la potencia requerida (watt-hora), el cual el panel tendrá que alimentar. (Ver la tabla 4.11)

Tabla 4.11 Consumo Energético Estimado

Equipos	Cantidad	Potencia (W)	Tiempo (h)	Energía (W)
celda fotovoltaica	1	260	3	780
<b>Consumo Energético Teórico E<sub>T</sub></b>			780	

Fuente: Elaboración propia.

Determinamos el consumo de energía total ( E )

$$E = \frac{E_T}{R} \quad (2)$$

$$R = (1 - k_b - k_c - k_v) \times \left( 1 - \frac{k_a N}{P_d} \right) \quad (3)$$

Dónde:

R: Parámetro de rendimiento global

E<sub>T</sub>: Consumo Energético Teórico (Wh)

k<sub>b</sub>: Coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador

0,05 en sistemas que no demanden descargas intensas

0,1 en sistemas con descargas profundas

k<sub>c</sub>: Coeficientes de pérdidas en el convertidor

0,05 para convertidores senoidales puros, trabajando en régimen óptimo

0,1 en otras condiciones de trabajo, lejos de lo óptimo.

$k_v$ : Coeficiente de perdidas varias, agrupa otras perdidas como (rendimiento de red, efecto joule, etc).

0,05-0,15 como valores de referencia

$k_a$ : Coeficientes de autodescarga diario

0,002 para baterías de baja auto descarga Ni-Cd

0,005 para baterías estacionarias de Pb-acido

0,012 para baterías de alta auto descarga (arranque de automóviles)

$N$ : Número de días de autonomía de la instalación

$P_d$ : Profundidad de descarga diaria de la batería

Los valores de coeficiente de pérdidas son:

$k_b = 0,1; k_c = 0,05; k_v = 0,05; k_a = 0,005; N = 4; P_d = 0,7$

$$R = (1 - 0,1 - 0,05 - 0,05) \times \left(1 - \frac{0,005 \times 4}{0,7}\right) = 0,777$$

Reemplazamos  $R$  en la siguiente ecuación:

$$E = \frac{780}{0,777}$$

$$E = 1003,86 \text{ Wh/dia}$$

Determinamos el número de paneles ( $NP$ ):

$$NP = \frac{E}{0,9 \times W_p \times HPS} \quad (4)$$

Dónde:

$HPS$ : Horas pico solar (h)

$W_p$ : Potencia pico de cada panel solar (V)

$$NP_{nov} = \frac{153,16}{0,9 \times 170 \times 5} = 1,09 \approx 1$$

**Discusión:** La determinación del número de paneles sirve para satisfacer el consumo energético de los equipos con las que se están trabajando y si necesitamos hacer funcionar una terma eléctrica, una plancha, un microondas, etc., se tiene que aumentar el número de paneles.



### Calculo para la Capacidad de Acumulación de Energía en las Baterías

$$C = \frac{E \times N}{V \times P_d} \quad (5)$$

Dónde:

$V$ : Tensión nominal del acumulador (12V)

$$C = \frac{1003,86 \times 3}{12 \times 0,5} = 501,5 \text{ Ah}$$

**Discusión:** La capacidad de las baterías o acumuladores dependen en gran manera del consumo de la energía real de los equipos que se está trabajando.

### Calculo para el Número de Reguladores a Utilizar

$$I = A_{SC} \times NP \quad (6)$$

$$I = 8A \times 1 = 8A$$

### Calculo para Seleccionar el Inversor Adecuado

$$P_{int} = \sum P_{Equipos} \quad (7)$$

$$P_{int} = P_{celda} \quad (8)$$

$$P_{inv} = P_{int} \times 1,5 \quad (9)$$

Dónde:

$P_{int}$ : Potencia Instantánea (W)

$P_{Equipos}$ : Potencia requerida por los equipos (W)

$P_{celda}$ : Potencia de la celda electroquímica (W)

$P_{inv}$ : Potencia del inversor (W)

$$P_{int} = 96,8W = 596,8W$$

$$P_{inv} = 596,8 \times 1,5 = 895,2W$$

**Hallando la eficiencia:**

$$n = \frac{P_U}{P_e} \times 100$$

$$n = \frac{1,185}{1,71} \times 100$$

$$n = 69,30\%$$

**Discusión:** La eficiencia de la corriente fotovoltaica nos arroja el 69,30 % muy cercano a la eficiencia utilizando corriente convencional. Por lo tanto es eficaz la utilización de esta energía renovable para este proceso electroquímico.

El lactosuero de la elaboración de productos lácteos en el distrito de Apata fue caracterizado en el laboratorio de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú obteniendo los siguientes resultados en la tabla 4.8 según el reporte nº :

Tabla 4.12 Características del Lactosuero Acido

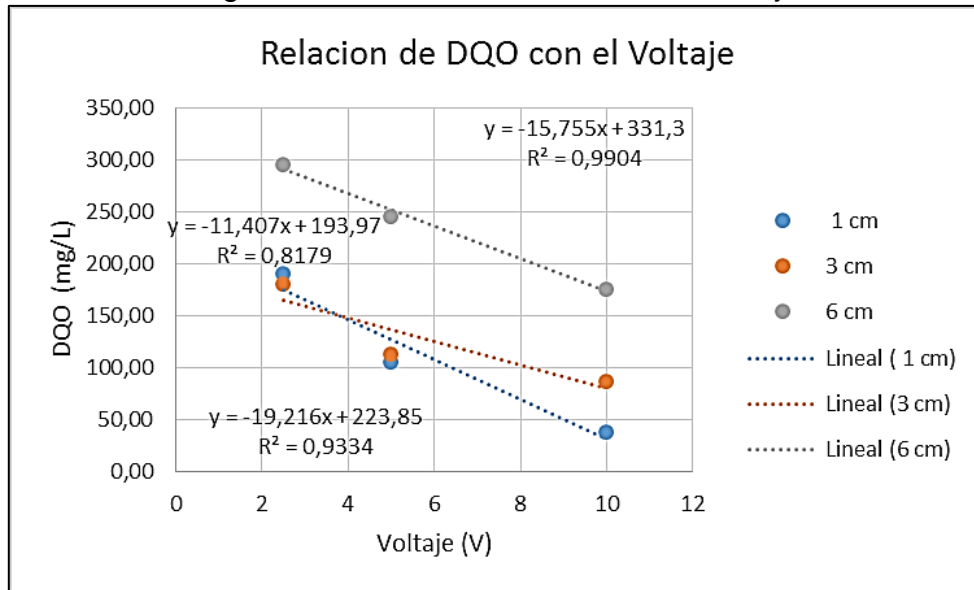
<b>Parámetros</b>	<b>Lactosuero Acido</b>
pH	4,43
Sólidos totales	5214 mg/L
Calcio	139,5 mg/L
Fosfatos	224,18 mg/L
Cloruros	90,7 mg/L
DQO	1725,5 mg/L
DBO <sub>5</sub>	1252,4 mg/L

Según los resultados de la caracterización se determinaron la relación de DBO/DQO es de 0,73 podemos decir que el lactosuero es biodegradable

La variación del voltaje en la disminución de la carga orgánica mediante un proceso de electrocoagulación se determinó con la relación lineal entre estas dos variables obteniendo la siguiente figura 02, donde la disminución de la carga orgánica analizado con DQO, resulta que cuando aumenta el voltaje aumentaría la disminución de la carga orgánica esto debido a que los voltaje

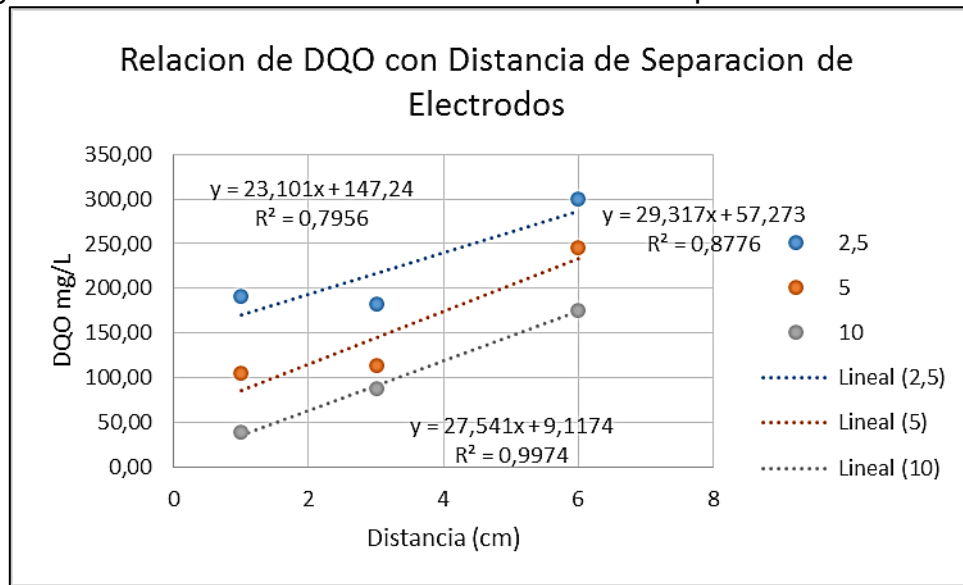
incrementa la corriente eléctrica y acelera la degradación de la materia orgánica así podemos observar las siguientes relaciones respecto a las distancias de separación de los electrodos en el sistema de electrocoagulación

Figura 4.6 Relación de DQO con el Voltaje



Según la figura 4.6 podemos observar la relación para cada voltaje aplicado al sistema de electrocoagulación, para el voltaje de 2,5 voltios se encuentra una relación de  $Y=23,101 \cdot X + 147,24$  con un coeficiente de relación de 0,7956; a diferencia para un voltaje de 5 voltios se encontró la relación de  $Y=29,317 \cdot X + 57,273$  con un coeficiente de relación de 0,8776 y para un voltaje de 10 voltios se encontró una relación de  $Y=27,541 \cdot X + 9,1174$  con un coeficiente de relación de 0,9974.

Figura 4.7 Relación de DQO con la Distancia de Separación de Electrodo



Según la figura 4.7 cuando se trabajó con una distancia de separación de electrodos de 1 cm se obtuvo la relación siguiente  $Y = -19,216 \cdot X + 223,85$  con un coeficiente de relación de 0,9334; con respecto a los 3 cm de separación de electrodos se encontró una relación de  $Y = -11,407 \cdot X + 193,97$  con un coeficiente de relación de 0,8179 y con una distancia de separación de 6 cm una relación de  $Y = -15,755 \cdot X + 331,3$  con un coeficiente de relación de 0,9904.

El efecto de la variación de la separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica es inversamente proporcional debido a que cuantos más cerca se encuentran los electrodos la degradación de la materia orgánica empezara a degradarse por el contacto que presentaron los iones con el efluente de tal manera que se buscó relacionar mediante relaciones lineales este comportamiento como se muestra en la figura 4.2

### 3.4. Contratación de Hipótesis

#### One-way ANOVA: 1 cm; 3 cm; 6 cm

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level  $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor Levels Values

Factor 3 1 cm; 3 cm; 6 cm

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0,011233	0,005617	4,37	0,068
Error	6	0,007720	0,001287		
Total	8	0,018953			

**Interpretación:** En el análisis estadístico se trabajó con el software Minitab 17, utilizando el análisis de Anova, ingresando los datos del % de Remoción de DQO promedio según distancia de separación de los electrodos, resultando el valor P-value = 0,068 siendo mayor al valor de significancia del 0,05; según este resultado podemos aceptar la hipótesis que la variación de las distancias de separación de los electrodos tiene diferencia significativa en la remoción de DQO del lactosuero mediante un proceso de electrocoagulación .

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0358690	59,27%	45,69%	8,36%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
1 cm	3	0,9379	0,0422	(0,8872; 0,9886)
3 cm	3	0,9258	0,0280	(0,8751; 0,9765)
6 cm	3	0,8576	0,0359	(0,8070; 0,9083)

Pooled StDev = 0,0358690

## Fisher Pairwise Comparisons

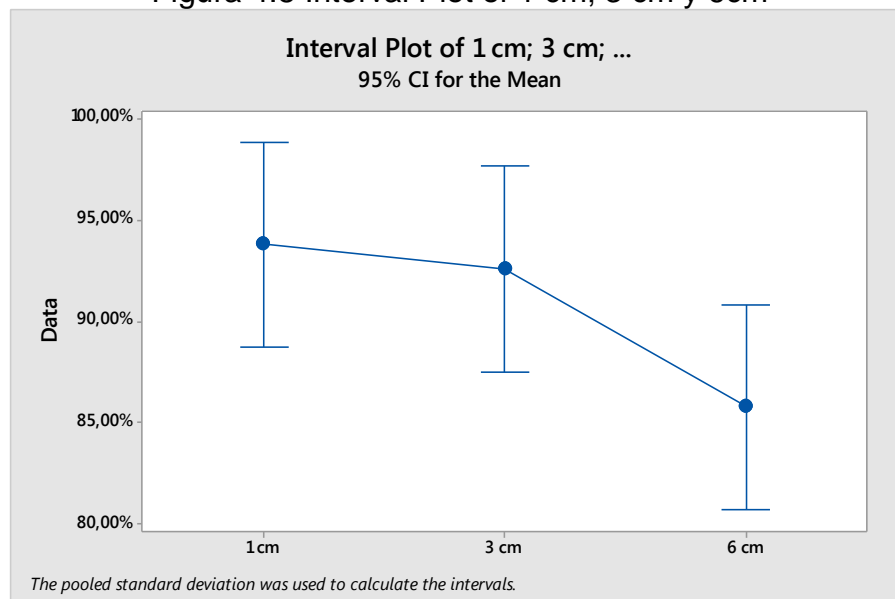
Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
1 cm	3	0,9379	A
3 cm	3	0,9258	A B
6 cm	3	0,8576	B

Means that do not share a letter are significantly different.

**Interpretación:** Al realizar la comparación de Fisher con el software Minitab 17, observamos los resultados en función de las medias lo cual si existen diferencia significativa entre la distancia de separación de electrodos de 1 cm con respecto al de y 6 cm mientras que la distancia de separación 3 respecto a las medias son casi cercanas por lo tanto las medias se encuentran en diferentes intervalos de confianza para cada factor y perteneciendo a diferentes grupos. Por lo consiguiente las distancias de separación de 1 cm y 3 cm pertenecen al grupo A y las distancias de separación de 3 cm y 6 cm pertenecen al grupo B.

Figura 4.8 Interval Plot of 1 cm; 3 cm y 6cm



En la Figura 4.8 Se observa que las diferencias de las medias respecto al % de remoción de DQO siendo mayor en las distancias de separación de los electrodos 1 cm y 3 cm a comparación con el de 6 cm que es menor

### One-way ANOVA: 2,5 V; 5 V; 10 V

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level  $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor Levels Values

Factor 3 2,5 V; 5 V; 10 V

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0,007388	0,003694	1,92	0,227
Error	6	0,011565	0,001928		
Total	8	0,018953			

**Interpretación:** En el análisis estadístico se trabajó con el software Minitab 17, utilizando el análisis de Anova, ingresando los datos del % de Remoción de DQO promedio según el voltaje aplicado al sistema, resultando el valor P-value = 0,227 siendo mayor al valor de significancia del 0,05; según este resultado podemos aceptar la hipótesis que la variación del voltaje aplicado en el sistema tiene diferencia significativa en la remoción de DQO del lactosuero mediante un proceso de electrocoagulación .

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0439034	38,98%	18,64%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
2,5 V	3	0,8708	0,0408	(0,8088; 0,9328)
5 V	3	0,9097	0,0485	(0,8476; 0,9717)
10 V	3	0,9409	0,0421	(0,8788; 1,0029)

Pooled StDev = 0,0439034

### Fisher Pairwise Comparisons

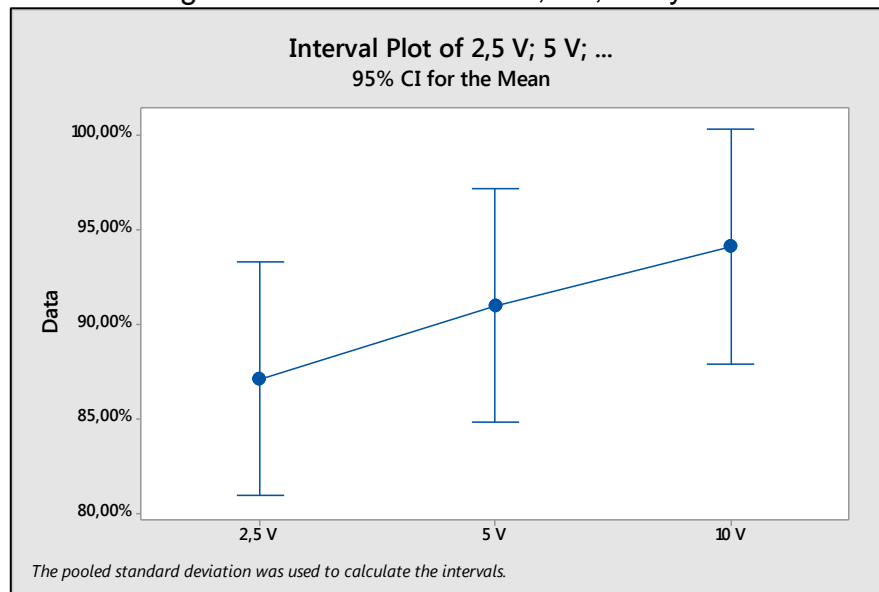
Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
10 V	3	0,9409	A
5 V	3	0,9097	A
2,5 V	3	0,8708	A

**Interpretación:** Al realizar la comparación de Fisher con el software Minitab 17, observamos los resultados en función de las medias de la DQO en función de voltaje aplicado en el sistema de electrocoagulación pertenecen a un solo grupo A por lo tanto todos se encuentran dentro del intervalo de confianza

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 4.9 Interval Plot of 2,5 V; 5 V y 10V



En la Figura 4.9 Se observa que la diferencias de las medias respecto al % de remoción de DQO con el volteje aplicado al sistema de electrocoagulación la mayor remoción se da con mayor voltaje.



## CONCLUSIONES.

- Se caracterizó el lactosuero ácido residual del distrito de Apata, provincia Jauja obteniendo los siguientes resultados: pH 4,4, sólidos totales 52,14 mg/L, calcio 139,5 mg/L, fosfatos 224,18 mg/L, cloruros 90,7 mg/L DQO 1725,5 mg/L, DBO 1252,4 mg/L.
- Se logró la remoción del DQO del lactosuero por el método de electrocoagulación. Siendo 1 cm la distancia óptima entre electrodos, 10 voltios a un tiempo de 3 horas la prueba de remoción máxima, que fue recomendada para realizar el experimento.
- La relación para cada voltaje aplicado al sistema de electrocoagulación, para el voltaje de 2,5 voltios se encuentra un coeficiente de relación de 0,7956; a diferencia para un voltaje de 5 voltios se encontró con un coeficiente de relación de 0,8776 y para un voltaje de 10 voltios se encontró con un coeficiente de relación de 0,9974. Cuando se trabajó con una distancia de separación de electrodos de 1 cm se obtuvo un coeficiente de relación de 0,9334; con respecto a los 3 cm de separación de electrodos se encontró un coeficiente de relación de 0,8179 y con una distancia de separación de 6 cm con un coeficiente de relación de 0,9904. El efecto de la variación de la separación de electrodos en la disminución de la carga orgánica es inversamente proporcional debido a que cuantos más cerca se encuentran los electrodos la degradación de la materia orgánica empezará a degradarse por el contacto que presentaron los iones con el efluente.
- Se determinó una eficiencia promedio de 97% en la remoción de DQO en el lactosuero ácido residual cumpliendo la normativa ambiental vigente.

## RECOMENDACIONES

- Por los resultados del lodo obtenido en este proceso, se recomienda profundizar en análisis de su composición biológica y química que permita plantear nuevas investigaciones referidas a este tema en particular.
- En las pruebas de laboratorio se utilizó como material para los electrodos el aluminio y el fierro, por lo cual se recomienda realizar pruebas con otros materiales como acero inoxidable, cobre, etc.
- La investigación que se realice en un futuro inmediato del proceso de electrocoagulación tendrá como antecedentes las revisiones y los experimentos que se hayan estructurado para alcanzar su objetivo, la optimización de la tecnología y de las alternativas en el aprovechamiento de las mismas.
- Los costos de montaje y operación son fundamentales en la aplicación de esta tecnología. Es por esto que cada caso en particular requiere de un estudio y análisis minucioso de los aspectos técnicos y económicos del proceso.
- La determinación del número de paneles sirve para satisfacer el consumo energético de los equipos con las que se están trabajando por lo que se recomienda el aumentar el número de paneles de acuerdo a la necesidad energética.

## BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).

(s.f.). Recuperado el 4 de Enero de 2014, de ECURED - Conocimiento con todos y para todos: <http://www.ecured.cu/index.php/Cromo>

Abaigar, A. (2009). El lactosuero en la alimentacion del ganado porcino. *ITG Ganadero*, 13-17.

Acosta, R. S. (Córdoba, Argentina). *Saneamiento ambiental e higiene de los alimentos*. 2008: Brujas.

Aider, M. H. (2009). Skim acidic milk whey cryoconcentration and assessment of its functional properties: Impact of processing conditions. *Innovative Food Science and Emerging*, 334-341.

Alvarez Contretas, A. y. (2006). *Tratamiento biologico del lixiviado generado en el relleno sanitario*. Colomba : Universidad del Norte.

Alvaro Arango Ruiz, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulacion para el tratamiento de aguas residuales de la industria lactea. *EAFIT*, 56-67.

Alvaro Arango Ruiz, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulacion para el tratamiento de aguas residuales de la industria lactea. *EAFIT*, 56-67.

Barrera, C. E. (2014). Historia y Evolucion de la electrocoagulacion. En *Aplicaciones electroquimicas al tratamiento d eaguas residuales*. (págs. 165-180). Reverte.

Branco, M. M. (1984). *“Limnología Sanitaria”*. *Estudio de la polución de aguas continentales*. Washington: OEA, programa regional de desarrollo científico y tecnológico.

Cajiao, M. F. (2009). Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos. *ECURED*

Cajiao, M. F. (2009). Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos. *ECURED*.

Campos Gómez, I. (2003). *Saneamiento Ambiental*. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad Estatal a Distancia - EUNED.

- Charles Alais, A. L. (1985). *Ciencia de la leche*. España: Reverte.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 11-41.
- Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana - CESPT. (26 de Febrero de 2014). *Cuido el agua.org*. Obtenido de Tipos de Agua: <http://www.cuidoelagua.org/empapate/origendelagua/tiposagua.html>
- Cristancho, D. M. (2010). Descripción del comportamiento de un prototipo para el comportamiento de un proceso electroquímico de aguas residuales industriales. *Academia y Virtualidad*, Vol.3.
- Cristancho, D. M. (2010). Descripciones del comportamiento de un prototipo para el tratamiento electroquímico de aguas residuales industriales. *Academia Y Virtualidad*, Vol.3.
- Diaz, C. E. (2014). *Aplicaciones Electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. Reverte.
- Dra. Erika Bustos Bustos, D. V.-C. (2012). Depuración por electrocoagulación de un lactosuero. *Tecnología Química*.
- Eddy., M. &. (2004). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Eduardo Ronzano, J. L. (2002). *Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales*. Pridesa .
- Eric Lichtfouse, J. S. (2013). *Materiales ecológicos de energía, productos y descontaminación*. Springer.
- Fair Gordon Maskew, G. J. (1994). *Ingeniería Sanitaria y de Aguas*. Mexico: Limusa.
- Garces, &. A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Mexico.
- García, F. C. (2012). Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual. *AIDIS*, 62-64.
- Gil, A. (2010). Composición y calidad nutritiva de los alimentos. *Tratado de nutrición*.

- gil, M. (2004). *Calculos avanzados en procesos de descontaminacion de aguas*. Fur Printing.
- Giraldo, A. A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación. *Universidad EAFIT*, 56-67.
- Glynn, H., & Heinke, G. (1999). *Ingenieria Ambiental* (Segunda ed.). México: Prentice Hall.
- Gopal. (1999). Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems. *Water Sci. Technol.*, 40, 27–35.
- Griselda Galindo, J. L. (2005). *Arsenico en aguas: Origen, movilidad y tratamiento*. Reverte.
- GRUNDFOS X. (13 de 04 de 2014). *Tratamiento químico: aguas residuales*. Obtenido de Tratamiento químico: aguas residuales: <http://es.grundfos.com/industries-solutions/applications/chemical-treatment-wastewater.html>
- GTZ. (1991). Manual de Disposición de Aguas Residuales. *Cepis--Ops-Oms*.
- Harris , D. (2007). *Analisis Quimico Cuantico*. Reverte.
- Hernández, F. M. (2010). Estudio de viabilidad económica para el tratamiento de aguas.
- Holt, P. K. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 355-367.
- Huijuan Liu, X. Z. (2010). Electrocoagulation en el tratamiento de agua. En X. Z. Huijuan Liu, *Electroquimica del medio ambiente*. (págs. 245-262). Nueva York: Springer.
- Irdemez S., D. N. (2006). The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Sep. Purif. Technol.*, 218-223.
- J. Glynn Henry, G. W. (1996). *Ingenieria ambiental*. Mexico: Prentice Halls Hispanoamericana.
- Jaramillo, A. O. (2005). *Bioingenieria de las aguas residuales*. Acodal.

- Juarez Rios, J. G., Roa Morales, G., & Hernandez Lopez, S. (10 de 03 de 2014). *Red de Ciencias Ambientales*. Obtenido de Red de Ciencias Ambientales: [http://www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/memorias/Resumen/TA/RO/TAO-55.pdf](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Resumen/TA/RO/TAO-55.pdf)
- Judith Callejas Hernández, V. E. (2012). Electrocoagulación una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Aidis*.
- Koutinas, A., Papapostolou, H., Dimitrellou, D., Kopsahelis, N., Katechaki, E., & Bekatorou, A. a. (2009). Whey valorisation: a complete and novel technology development for dairy industry starter culture production. *Bioresource Technology*, 3734-3739.
- Krishnam Rajeshwar, J. G. (1997). *Electroquímica Ambiental: Fundamentos y aplicaciones en reducción de la contaminación*. Prensa académica.
- Lapeña, M. R. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. Marcombo.
- Luis F. Garcés, A. A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación. *Universidad EAFIT*, 56-67.
- M., S. (2000). Conceptos para tratamientos de residuos lácteos. *AYMERICH*, p. 12.
- Marín, S. (2002). *Tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de humedales artificiales a nivel laboratorio*. Facultad de Química. Universidad Autónoma del Estado de México.
- MEM. (s.f.). *Dirección General de Electrificación Rural DGRR-MEM*. Peru.
- Metcalf, E. (1998). *Ingeniería de aguas residuales : Tratamiento, vertido y reutilización* . Universidad Castilla la Mancha.
- Michel Mayer, T. I. (2010). Procedimiento integrado de electro-oxidación fotocatalítica para la depuración y reutilización de aguas residuales urbanas.
- MINAM. (2010). *Estandares de Calidad Ambiental* . Peru.
- Miranda, R. (2000). Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal de México. *Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México*.

- Mollah, M. &. (2001). Electrocoagulation (EC) . *Science and applications: Journal of Hazardous Materials*, 29-41.
- Nassef, D. (2012). Removal of Phosphorous Compounds by Electrochemical Technique. *IRACST*.
- OMS. (1993). *Estandares Internacionales de calidad del agua*.
- Organizacion Panamericana de la Salud - Organizacion Mundial de la Salud. (27 de Febrero de 2014). *Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental*. Obtenido de Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/033446/033446-02.pdf>
- Parra, R. A. (2009). Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos. *Fac. Nat. Agr. Medellín* , 4967-4982.
- Peters, R. (2005). Economic aspects of cheese making as influenced by whey processing options. *International Dair Journal*, 537-545.
- Puente Santibáñez, L. (2002). *Precipitacion Quimica y Adsorcion en el tratamiento*. Lima, Perú: Revista del instituto de investigación de la facultad de geología, minas, metalurgia, y ciencias geográficas.
- Quipuzco, E. (2002). Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con Eichornia Crassipes para el tratamiento de aguas residuales. *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geogr.*, 52-57.
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. REVERTE.
- Restrepo, A. A. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, 58-77.
- Rigola Lapeña, M. (1990). *Tratamiento de Aguas Industriales: Aguas de proceso y residuales*. Barcelona, España: MARCOMBO.
- Rodriguez, M. G. (2006). *Depuracion de aguas residuales: Modelizacion de procesos de lodos activos*. España: Pined in Spain.
- Ruiz, A. A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulation para el tratamiento de aguas residuales. *REVISTA Universidad EAFIT*.

- Sanchez, M. (2010). *Tratamiento de Aguas para la Eliminación de Microorganismos y Agentes Contaminantes (Aplicación de Procesos Industriales a la Reutilización de Aguas Residuales)*. Madrid: Diaz y Santos.
- Secretaria Distrital del Ambiente- Bogotá. (8 de Octubre de 2014). *Guía para la gestión y maneja integral de residuos de industria de curtiembres y tenerías*. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Sharma, D. (2014). Treatment of dairy waste water by electro coagulation using aluminum electrodes and settling, filtration studies. *ChemTech*.
- Sharpe, A. G. (1993). *Química inorgánica*. Barcelona: Reverte.
- Sigfrido M. S., & S. (2000). Conceptos para tratamientos de residuos lacteos. *Aymerich*, p. 12.
- Silvio J. Castillo, N. L. (2009). Diagnóstico de las queseras artesanales y su impacto en el medio ambiente.
- Torrecillas, A. S. (2003). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. Valencia: Universidad Politecnica.
- Umaña, O. (2012). *Biodigestión Como Tratamiento de Aguas Residuales de Granjas Lecheras*. EAE.
- Universidad de Salamanca. (13 de 04 de 2014). *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua*. Obtenido de CIDTA: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/quimica.pdf>
- Valencia, E., & Ramirez, M. L. (2009). *La industria de la leche y la contaminación del agua*. España: Elementos.
- Valero, D. M. (2014). Tratamiento de aguas residuales. 50-61.
- Veisseyre, R. (1988). *Lactología Técnica 3ª Edición*. Argentina: Acribia.
- Viloria, J. R. (2011). *Necesidades energéticas y propuestas de instalaciones solares*. España: Paraninfo.
- Xavier Domenech, J. p. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres*. Reverte.



## **ANEXOS.**

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE LACTOSUERO RESIDUAL

Figura 1. Celda de electrocoagulación



Figura 2. Electrodo de Al y Fe



Figura 3. Fuente de Poder



Figura 4. Cocodrilos



Figura 5. Tubos de Ensayo



Figura 6. Lactosuero



Figura 7. Disposición de electrodos.



Figura 8. Equipo de completo.



Figura 9. Sistema fotovoltaico completo



**PROCESO DE TRATAMIENTO DEL LACTOSUERO RESIDUAL CON EL EQUIPO DE ELECTROCOAGULACIÓN CONECTADO A UN SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Figura 10. Medición de la muestra



Figura 11. Separación de electrodos



Figura 12. A 2.5 voltios



Figura 13. Proceso de formación de lodos

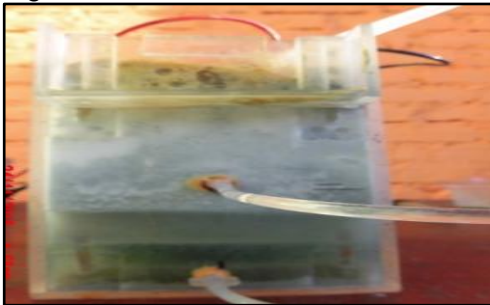


Figura 14. Lodos residuales



Figura 15. A 5 voltios



Figura 16. Proceso de formación de lodos



Figura 17. Lodos residuales



Figura 18. A 10 voltios



Figura 19. Proceso de formación de lodos



Figura 20. Lodos residuales



Figura 21. Muestra a 2.5 V



Figura 22. Muestra a 5 V



Figura 15. Muestra a 10 V



Figura 16. Muestra inicial y final

