

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUÍMICA**



**“INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN  
MÓDULO DE ELECTRODIÁLISIS EN LA DESMINERALIZACIÓN  
DE AGUA DE PURGA DE CALDERO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**JUAN CARLOS BAZÁN GÓMEZ**

**CALLAO, Setiembre, 2017**

**PERÚ**





## **PRÓLOGO DEL JURADO**

El presente informe fue expuesto por el bachiller **BAZÁN GÓMEZ; JUAN CARLOS** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**; conformado por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

ING. ANCIETA DEXTRE, CARLOS ALEJANDRO : PRESIDENTE

ING. LAZO CAMPOSANO, ROBERTO : SECRETARIO

ING. CARLOS PREYRA, LEONARDO RUFINO : VOCAL

ING. MEDINA COLLANA, JUAN TAUMATURGO : ASESOR

Tal como está asentado en el **LIBRO DE ACTAS 2 DE TESIS, FOLIO N° 94 Y ACTA N°277** de fecha **CINCO DE SETIEMBRE DEL 2017**, para la obtención del título profesional de Ingeniero Químico en la modalidad de Titulación por Tesis, de conformidad establecido por el reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011, Resolución N° 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012.

## **DEDICATORIA**

*“Esta investigación está dedicada a mis padres que siempre me han inculcado nunca rendirme”*

5.2.1.8 Muestra N° 8	129
5.2.1.9 Muestra N° 9	135
5.2.2 Resultados de la 1° ronda de pruebas experimentales	141
5.2.2.1 Muestra N° 1	141
5.2.2.2 Muestra N° 2	147
5.2.2.3 Muestra N° 3	153
5.2.2.4 Muestra N° 4	159
5.2.2.5 Muestra N° 5	165
5.2.2.6 Muestra N° 6	171
5.2.2.7 Muestra N° 7	177
5.2.2.8 Muestra N° 8	183
5.2.2.9 Muestra N° 9	189
5.3 Resultados de la calidad del agua de los diluidos finales al terminar la electrodiálisis	195
5.3.1 Calidad del agua de los diluidos finales de la 1° ronda de pruebas experimentales	195
5.3.2 Calidad del agua de los diluidos finales de la 2° ronda de pruebas experimentales	197
<b>VI PRESUPUESTO</b>	<b>199</b>
6.1 Contrastación de hipótesis con los resultados	200
6.1.1 Contraste con la 1° hipótesis específica	200
6.1.2 Contraste con la 2° hipótesis específica	208
6.1.3 Contraste con la 3° hipótesis específica	214
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares	224

<b>VII CONCLUSIONES</b>	<b>226</b>
<b>VIII RECOMENDACIONES</b>	<b>227</b>
<b>IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>228</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>231</b>
MATRIZ DE CONSISTENCIA	232
VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS	234

<b>5.21</b>	<b>Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo</b>	<b>108</b>
<b>5.22</b>	<b>Coeficientes para la regresión hiperbólica</b>	<b>108</b>
<b>5.23</b>	<b>Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis</b>	<b>111</b>
<b>5.24</b>	<b>Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis</b>	<b>112</b>
<b>5.25</b>	<b>Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo</b>	<b>114</b>
<b>5.26</b>	<b>Coeficientes para la regresión hiperbólica</b>	<b>114</b>
<b>5.27</b>	<b>Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis</b>	<b>117</b>
<b>5.28</b>	<b>Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis</b>	<b>118</b>
<b>5.29</b>	<b>Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo</b>	<b>120</b>
<b>5.30</b>	<b>Coeficientes para la regresión hiperbólica</b>	<b>120</b>
<b>5.31</b>	<b>Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis</b>	<b>123</b>
<b>5.32</b>	<b>Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis</b>	<b>124</b>
<b>5.33</b>	<b>Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo</b>	<b>126</b>
<b>5.34</b>	<b>Coeficientes para la regresión hiperbólica</b>	<b>126</b>

<b>5.35</b>	Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis	129
<b>5.36</b>	Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis	130
<b>5.37</b>	Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo	132
<b>5.38</b>	Coefficientes para la regresión hiperbólica	132
<b>5.39</b>	Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis	135
<b>5.40</b>	Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis	136
<b>5.41</b>	Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo	138
<b>5.42</b>	Coefficientes para la regresión hiperbólica	138
<b>5.43</b>	Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis	141
<b>5.44</b>	Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis	142
<b>5.45</b>	Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo	144
<b>5.46</b>	Coefficientes para la regresión hiperbólica	144
<b>5.47</b>	Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis	147
<b>5.48</b>	Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis	148

<b>5.49</b>	Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo	150
<b>5.50</b>	Coeficientes para la regresión hiperbólica	150
<b>5.51</b>	Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis	153
<b>5.52</b>	Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis	154
<b>5.53</b>	Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo	156
<b>5.54</b>	Coeficientes para la regresión hiperbólica	156
<b>5.55</b>	Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis	159
<b>5.56</b>	Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis	160
<b>5.57</b>	Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo	162
<b>5.58</b>	Coeficientes para la regresión hiperbólica	162
<b>5.59</b>	Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis	165
<b>5.60</b>	Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis	166
<b>5.61</b>	Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo	168
<b>5.62</b>	Coeficientes para la regresión hiperbólica	168

<b>5.77</b>	<b>Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo</b>	<b>192</b>
<b>5.78</b>	<b>Coeficientes para la regresión hiperbólica</b>	<b>192</b>
<b>5.79</b>	<b>Diluidos obtenidos mediante electrodiálisis</b>	<b>196</b>
<b>5.80</b>	<b>Diluidos obtenidos mediante electrodiálisis</b>	<b>196</b>
<b>5.81</b>	<b>Diluidos obtenidos mediante electrodiálisis</b>	<b>196</b>
<b>5.82</b>	<b>Diluidos obtenidos mediante electrodiálisis</b>	<b>197</b>
<b>5.83</b>	<b>Diluidos obtenidos mediante electrodiálisis</b>	<b>197</b>
<b>5.84</b>	<b>Diluidos obtenidos mediante electrodiálisis</b>	<b>198</b>
<b>6.1</b>	<b>Porcentaje de separación de sales obtenido en cada prueba experimental</b>	<b>199</b>
<b>6.2</b>	<b>Porcentaje de separación de sales obtenido en cada prueba experimental</b>	<b>200</b>
<b>6.3</b>	<b>Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 5v</b>	<b>201</b>
<b>6.4</b>	<b>Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 10v</b>	<b>201</b>
<b>6.5</b>	<b>Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 15v</b>	<b>202</b>
<b>6.6</b>	<b>Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 5v</b>	<b>203</b>
<b>6.7</b>	<b>Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 10v</b>	<b>203</b>
<b>6.8</b>	<b>Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 15v</b>	<b>204</b>



<b>6.9</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 5v	205
<b>6.10</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 10v	206
<b>6.11</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 15v	206
<b>6.12</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel bajo de conductividad eléctrica	208
<b>6.13</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel medio de conductividad eléctrica	209
<b>6.14</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel alto de conductividad eléctrica	209
<b>6.15</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel bajo de conductividad eléctrica	211
<b>6.16</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel medio de conductividad eléctrica	211
<b>6.17</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel alto de conductividad eléctrica	212
<b>6.18</b>	Comparación del Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a la conductividad eléctrica promedio	213
<b>6.19</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 120mL/min	214
<b>6.20</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 150mL/min	215

<b>6.21</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 180mL/min	215
<b>6.22</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 120mL/min	217
<b>6.23</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 150mL/min	217
<b>6.24</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 180mL/min	217
<b>6.25</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 120mL/min	219
<b>6.26</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 150mL/min	219
<b>6.27</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 180mL/min	220
<b>6.28</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 120mL/min	221
<b>6.29</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 150mL/min	222
<b>6.30</b>	Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 180mL/min	223

## **ÍNDICE DE GRÁFICAS**

<b>4.1</b>	Determinación gráfica de la corriente eléctrica límite	73
<b>5.1</b>	Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo	89

<b>5.27</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>140</b>
<b>5.28</b>	<b>Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>143</b>
<b>5.29</b>	<b>Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico</b>	<b>145</b>
<b>5.30</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>146</b>
<b>5.31</b>	<b>Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>149</b>
<b>5.32</b>	<b>Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico</b>	<b>151</b>
<b>5.33</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>152</b>
<b>5.34</b>	<b>Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>155</b>
<b>5.35</b>	<b>Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico</b>	<b>157</b>
<b>5.36</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>158</b>
<b>5.37</b>	<b>Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>161</b>
<b>5.38</b>	<b>Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico</b>	<b>163</b>
<b>5.39</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>164</b>
<b>5.40</b>	<b>Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>167</b>
<b>5.41</b>	<b>Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico</b>	<b>169</b>
<b>5.42</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>170</b>
<b>5.43</b>	<b>Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>173</b>
<b>5.44</b>	<b>Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico</b>	<b>175</b>
<b>5.45</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>176</b>
<b>5.46</b>	<b>Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>179</b>
<b>5.47</b>	<b>Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico</b>	<b>181</b>
<b>5.48</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>182</b>
<b>5.49</b>	<b>Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>185</b>
<b>5.50</b>	<b>Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico</b>	<b>187</b>
<b>5.51</b>	<b>Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo</b>	<b>188</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>2.1</b>	<b>Separación de iones mediante electrodiálisis</b>	<b>32</b>
<b>2.2</b>	<b>Permselectividad iónicas de la membrana de intercambio catiónica</b>	<b>33</b>
<b>2.3</b>	<b>Permselectividad iónicas de la membrana de intercambio aniónica</b>	<b>34</b>
<b>2.4</b>	<b>Efecto de polarización por concentración en las celdas internas</b>	<b>34</b>
<b>2.5</b>	<b>Esquema de un sistema generación de vapor</b>	<b>44</b>
<b>2.6</b>	<b>Esquema de aplicación del módulo de electrodiálisis para tratar el agua de purga de un caldero</b>	<b>48</b>
<b>2.7</b>	<b>Corrosión por oxígeno en los tubos internos</b>	<b>51</b>
<b>2.8</b>	<b>Corrosión caustica</b>	<b>52</b>
<b>2.9</b>	<b>Incrustación sobre los tubos internos</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Relación de las Variables</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Etapas de investigación</b>	<b>62</b>
<b>4.2</b>	<b>Esquema del módulo de electrodiálisis</b>	<b>66</b>
<b>4.3</b>	<b>Esquema de la celda de electrodiálisis</b>	<b>67</b>
<b>4.4</b>	<b>Vista de la celda de electrodiálisis</b>	<b>69</b>
<b>4.5</b>	<b>Vista completa del módulo de electrodiálisis</b>	<b>70</b>
<b>4.6</b>	<b>Reactivos de la prueba de campo para medir alcalinidad</b>	<b>74</b>
<b>4.7</b>	<b>Reactivos de la prueba de campo para medir dureza total</b>	<b>75</b>
<b>4.8</b>	<b>Reactivos de la prueba de campo para medir cloruros</b>	<b>75</b>

<b>4.9</b>	<b>Reactivo, ferrómetro y celda de medición para medir hierro total</b>	<b>76</b>
<b>4.10</b>	<b>Conductímetro y su solución calibradora</b>	<b>76</b>
<b>4.11</b>	<b>PH metro y sus electrolitos calibradores</b>	<b>77</b>
<b>4.12</b>	<b>Multímetro Prasek®</b>	<b>77</b>

## RESUMEN

En las últimas décadas, las tecnologías de membranas aplicadas al tratamiento de aguas residuales han experimentado un rápido desarrollo. Ya que no generan excesivos residuos peligrosos ni requieren la dosificación de otros productos químicos al agua residual a tratar.

Una de estas tecnologías que se ha venido desarrollando es la electrodiálisis la cual es un proceso de membrana, impulsado eléctricamente y normalmente utilizado para desmineralizar aguas salobres. Desde hace ya tiempo esta tecnología se ha venido mejorando con la evolución de la polarización eléctrica revertida, demostrando su efectividad reduciendo los sólidos totales disueltos en diversos tipos de agua residual.

Durante el proceso de generación de vapor el agua interna de un caldero se requiere mantener diversos parámetros de calidad de agua dentro de óptimos rangos de operación, para evitar sobrepasar estos rangos se purgan los calderos drenando parte del agua interna de operación, la cual por lo general simplemente se desecha a la red pública del desagüe.

Esta tesis plantea la manera en que los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis influyen en la reducción de la conductividad eléctrica del agua de purga de un caldero con el fin de brindar una posibilidad de poder tratar este efluente; pues usualmente en el Perú, se drena a la red pública sin realizarse ningún post tratamiento. Utilizando la electrodiálisis se reducirán los sólidos totales disueltos y otros componentes inorgánicos como las sales duras para evaluar la posibilidad de reutilizar este efluente en la alimentación del caldero.

**Palabras clave:** Electrodiálisis, tecnología de membranas, agua de purga de caldero, calidad del agua, tratamiento de efluentes.

## ABSTRACT

In recent decades, membrane technologies applied to wastewater treatment have been rapidly developing. As they do not generate excessive hazardous waste or require the dosing of other chemicals into the wastewater to be treated.

One of these technologies that has been developed is electrodialysis which is a membrane process, electrically driven and normally used to demineralize brackish water. For some time this technology has been improving with the evolution of reversed electrical polarization, demonstrating its effectiveness reducing the total solids dissolved in various types of wastewater.

During the process of steam generation the internal water of a boiler is required to maintain various parameters of water quality within optimal operating ranges, to avoid exceeding these ranges the boilers are drained by draining part of the internal water of operation, which for this general reason is simply dumped into the public drainage network.

This thesis discusses the way in which the operating parameters of an electrodialysis module influence the reduction of the electric conductivity of the boiler blowdown water in order to provide a possibility of being able to treat this effluent; As usually in Peru, is drained to the public network without any post-treatment. Using electrodialysis, the total dissolved solids and other inorganic components such as hard salts will be reduced to evaluate the possibility of reusing this effluent as boiler feedwater.

**Key words:** Electrodialysis, membrane technologie, boiler blowdown water, water quality, effluent treatment.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

### 1.1 Identificación del problema

A nivel industrial la demanda de energía para los diversos procesos productivos es satisfecha a través de la generación de vapor; la producción de vapor para la industria es realizada mediante los calderos. Los cuales pueden usar como fuente calórica variados combustibles fósiles, diversos tipos de biomasa hasta incluso residuos domésticos; y a lo largo de los años se han desarrollado diversos sistemas y accesorios para obtener una mayor eficiencia energética recuperando y / o reutilizando el calor de las líneas de condensado y purga.

Fundamentalmente el tratamiento del agua para la generación de calor mediante calderos se ha centrado en el agua de alimentación para estos equipos, mediante el desarrollo y mejora de las tecnologías para su pretratamiento como el ablandamiento, desalcalinizado o desmineralizado de esta agua. También se realizan diversos programas químicos, los cuales dosificados en el caldero evitan la corrosión e incrustación de las superficies internas del caldero, las líneas de condensado y vapor.

Debido a que actualmente el agua se ha convertido en un bien escaso, el cual debe utilizarse con mayor eficiencia, su post tratamiento luego de algún proceso productivo se ha vuelto necesario; tanto para reusarla para en el proceso o en parte de los servicios de la planta o finalmente brindar un adecuado nivel para su desecho hacia la red pública de desagüe o fuentes de agua dulce.



La tecnología de la electrodiálisis ya ha demostrado su viabilidad en el tratamiento de aguas residuales de diversos tipos, pero hasta ahora no se ha comprobado que tan efectivas serían en el tratamiento del agua que se desecha durante el purgado de los calderos. Ya que en el Perú actualmente a lo mucho se recupera la energía calorífica de estas aguas residuales y por lo general se desecha directamente a los desagües urbanos sin ningún post tratamiento. No conociéndose si luego de un tratamiento podría reutilizarse para alimentar nuevamente al caldero o para acondicionarla para otro uso dentro de la planta.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿Cómo influirán los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis en la desmineralización del agua de purga de un caldero?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- a) ¿Cuál será el potencial eléctrico necesario para desmineralizar el agua de purga de un caldero mediante un módulo de electrodiálisis?
- b) ¿Cuál será la conductividad eléctrica inicial en el agua de purga de un caldero para lograr una mejor desmineralización usando un módulo de electrodiálisis?
- c) ¿Cuál será el flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis para lograr una mejor desmineralización del agua de purga de caldero?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo principal**

Conocer la influencia de los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis para desmineralizar el agua de purga de un caldero.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Determinar el potencial eléctrico necesario en la operación de un módulo de electrodiálisis para la desmineralización del agua de purga de caldero.
  
- b) Establecer la conductividad eléctrica inicial en el agua de purga de un caldero con la cual se logra una mejor desmineralización empleando un módulo de electrodiálisis.
  
- c) Determinar con cual flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis se logrará una mejor desmineralización del agua de un caldero.

### **1.4 Justificación de la investigación**

La existencia de esta investigación tiene 3 tipos de justificación:

#### **1.4.1 Justificación Legal**

En la actualidad, según el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338; Capítulo VII: Reúso de Aguas Residuales Tratada – Artículo 148; se estipula que para el reúso del agua residual bajo 2 condiciones:

del potencial aplicado. Demostraron que en su celda modificada de electrodiálisis integrada a electrodeposición lograron una recuperación ligeramente mayor a la de una celda de electrodiálisis convencional, los investigadores propusieron una nueva investigación para el modelo matemático de su celda modificada.

2. La tecnología de la electrodiálisis tuvo una investigación sobre Experimentos Piloto para Producir un Fertilizante con Electrodiálisis y Ozonización de Orina – Pilot Experiments with Electrodialysis and Ozonation for Production of Fertilizer from Urine – (Pronk, Zuleeg y otros; 2009); lograron separar principalmente urea y, otros compuestos nitrogenados y fosforados inorgánicos; mediante la electrodiálisis de la orina con una recuperación de sales del 60%; posteriormente con la ozonización se consiguió la eliminación por oxidación de componentes microbiológicos, farmacéuticos y hormonas, produciendo el fertilizante. Se observó que el proceso no afectó la vida útil estimada de la membrana de electrodiálisis, ya que las pruebas en la fase de separación por electrodiálisis se realizaron durante 1 año por la variedad de muestras de orina acumuladas.
3. En el artículo Electrodiálisis ejemplos de Interés Industrial (Ochoa, Camino y otros; 2003); dieron a conocer la factibilidad de recuperar en efluentes del campo de la química fina mediante esta tecnología de membranas; la electrodiálisis separó de un efluente proveniente de la industria agroquímica a los ácidos glicólico y ácido oxálico; al no incluirse productos químicos para la purificación y la sólo aplicación de energía eléctrica en el módulo de electrodiálisis utilizado, reafirma a esta

tecnología como una que permite hermanar el desarrollo industrial con la preservación del medio ambiente. mostrado además su gran potencial como tecnología sostenible para el aislamiento y purificación de compuestos orgánicos iónicos.

4. En otro campo industrial hay una investigación sobre la Recuperación de del Agua de Inyección con Polímeros Producida en la extracción de crudo - Reclamation of the Polymer - Flooding Produced Water (Han, C; Liu, Y; Zhao, T; Jing, G: 2009); con el fin de resolver el problema de descarga de los polímeros inyectados en el agua producida (PFPW) durante la extracción del petróleo crudo mediante electrodiálisis reversible (EDR) puesta a punto. Los resultados de las pruebas mostraron que el PFPW tratada tiene dos tipos; uno es el PFPW diluido producto del tratamiento, en donde sus sólidos disueltos totales es menor que el presente en el PFPW original, la diluido tratado PFPW es factible para colectar una nueva solución de polímeros; el otro es el PFPW que se ha concentrado, los TDS de este concentrado excede al del PFPW original, la PFPW tratada como parte del concentrado es factible para la sustitución de la PFPW durante la inyección de agua para la extracción de petróleo crudo, pudiendo reutilizarse si consumir más agua fresca. Esta tecnología de tratamiento no sólo puede disminuir la contaminación del medio ambiente provocado por la descarga PFPW, sino también lograr circuito cerrado del recurso hídrico durante la extracción de petróleo crudo mediante el uso de la tecnología de inyección de polímeros.
5. Un antecedente sobre la Remoción de Trazas de Contaminantes Inorgánicos en Comunidades Australianas Remotas mediante

Electrodiálisis – The Removal of Inorganic Contaminants by Electrodialysis in Remote Australian Communities (Banasiak, L. y Schäfer, A: 2012); se demostró que la electrodiálisis es una tecnología efectiva para la remoción de los Sólidos Totales Disueltos incluyendo las trazas de contaminantes inorgánicos que provenían de aguas salobre subterráneas hasta llevarlos a los niveles permisibles de la legislación Australiana.

En general la electrodiálisis demostró no generar excesivos residuos peligrosos ni requerir la dosificación de otros productos químicos al agua residual a tratar. Como ya se ha mencionado no se conocen de antecedentes de recuperación del agua que se purga del caldero utilizando la tecnología de membranas de electrodiálisis con la intención de poder reutilizarla como alimentación de este mismo equipo.

## **2.2 Marco conceptual teórico científico**

### **2.2.1 La electrodiálisis**

La electrodiálisis es un proceso de membrana, impulsado eléctricamente, utilizado para desmineralizar aguas salobres. El uso de la electrodiálisis para la desmineralizar el agua salobre data de 1950 y su tecnología ha avanzado rápidamente debido al desarrollo de membranas con mejores materiales y con la evolución de la polaridad invertida. El agua salobre es un agua con elevados niveles de sólidos totales los cuales usualmente van desde los 1000ppm a 30000ppm. El paso de electricidad a través de membranas polarizadas reduce los niveles de sólidos totales disueltos en el agua.

Estas 2 membranas tienen que interactuar juntas dentro de la celda de electrodiálisis para poder lograr la dilución y la concentración del efluente inicial para su purificación mediante esta tecnología.

#### **a) Composición de las membranas de electrodiálisis**

Las membranas de electrodiálisis están formadas por unas estructuras poliméricas entrecruzadas a modo de tejido que funcionan como soporte; los más comunes son el vinilpoliestireno o la vinilpiridina, y tienen incrustados entre los intersticios del tejido grupos funcionales iónicos que le dan las cargas tanto positivas como negativas a las membranas de intercambio.

- Las membranas de intercambio catiónico reciben su carga negativa debido a los grupos funcionales carboxilato  $-\text{COO}^-$  o sulfonato  $-\text{SO}_3^-$ , para intercambiar y permitir el paso de cationes.
- Las membranas de intercambio aniónico reciben su carga positiva debido a los grupos funcionales amonio cuaternario  $-\text{NR}_3^+$  o amino terciario  $-\text{NR}_2^+$ , para intercambiar y permitir el paso de aniones.

#### **b) Tipos de membranas de electrodiálisis**

En la actualidad hay varios tipos de membranas con propiedades específicas y para funciones particulares, siendo ambos tipos de membranas; la catiónica y la aniónica una denominación para clasificarlas de acuerdo a su capacidad de intercambio.

A su vez estas mismas membranas clasificadas por su estructura física como:

- Membranas homogéneas; son las que tienen propiedades uniformes en todos sus puntos, usualmente construidas mediante una reacción de polifenoles o poliaminas, sobre un tejido polimérico de soporte inerte como el teflón o el polietileno.
- Membranas heterogéneas; debido a que son construidas por 2 fases poliméricas distintas presentan microcanales de flujo dentro de la estructura de estas, comúnmente ocasionando que sean más ineficientes al no ser completamente permeables al solvente.

#### 2.2.1.2 Indicadores de la desmineralización por electrodiálisis

Durante la desmineralización por electrodiálisis, principalmente se realiza el seguimiento de la evolución de la conductividad eléctrica del efluente que se desea purificar, durante y sobre todo al culminar con la operación se realiza el cálculo del Porcentaje de Separación de Sales - %SS; el cual se calcula de la siguiente manera:

Porcentaje de separación de sales: 
$$\%SS = \left( \frac{TDS_{(t=0)} - TDS_{(t=t)}}{TDS_{(t=0)}} \right) \times 100\%$$

Donde:

**TDS<sub>(t=0)</sub>**: Concentración de Sólidos Totales Disueltos en la muestra al inicio de la operación de electrodiálisis. Medidos en mg/L o partes por millón – ppm.

**TDS** <sub>(t=1)</sub>: Concentración de Sólidos Totales Disueltos en la muestra durante un tiempo asignado para la operación de electrodiálisis. Medidos en mg/L o partes por millón – ppm.

La concentración de sólidos totales disueltos en el agua o efluente se relaciona con la conductividad eléctrica, mediante la siguiente correlación empírica:

$$TDS = 0.5 * K$$

Donde:

**TDS**: Concentración de Sólidos Totales Disueltos en la muestra. Medidos en mg/L o partes por millón – ppm.

**K**: Conductividad eléctrica de una muestra acuosa. Medidos en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 2.2.1.3 Aplicaciones de la electrodiálisis

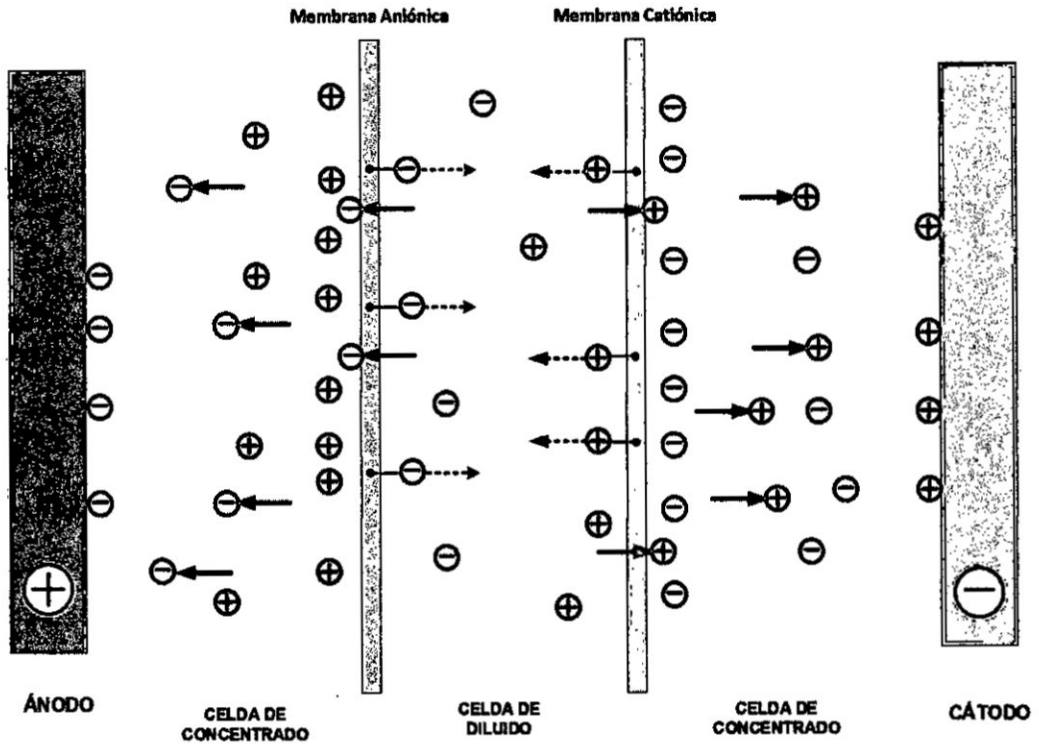
Las principales aplicaciones de la electrodiálisis comprenden la separación de minerales por eso no es sorprendente que este proceso sea usado ampliamente para desalación, donde hay una competencia directa con la ósmosis inversa, como, por ejemplo:

- Desalación del agua salobre
- Concentración de agua marina
- Desalación de agua marina
- Desmineralización de suero



misma solución a purificar y se anula el transporte por diferencia de potencial. Además de desgastar a las membranas.

**Figura 2.4**  
Efecto de polarización por concentración en las celdas internas



Fuente: Elaboración propia

Durante efecto de polarización se reduce la velocidad de transferencia entre las membranas y eleva la velocidad de difusión dentro del diluido, ocasionando:

- Elevación de la concentración sobre las membranas en los lados de las celdas de concentrado.
- Elevación de la concentración en la celda del diluido

Esta polarización de la concentración nos produce como efecto negativo sobre el proceso de electrodiálisis:

- Incremento brusco de la resistencia eléctrica de la celda de electrodiálisis; tanto en las celdas aniónicas como catiónicas.
- Disminución de la eficiencia del paso de corriente en la muestra a purificar.
- Un mayor consumo de energía eléctrica

Este efecto puede reducirse lográndose determinar la Corriente límite para el proceso de separación.

### 2.2.2 El caldero y su agua interna

La caldera, en la industria, es una máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase a vapor saturado.

Siendo a escala industrial básicamente de 2 tipos:

- **Acuotubulares:** son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por tubos durante su calentamiento. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación.
- **Piro-tubulares:** son aquellas donde el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente atravesado por tubos, por los cuales circulan

gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión. El agua se evapora al contacto con los tubos calientes productos a la circulación de los gases de escape.

### **2.2.2.1 Evolución de los calderos industriales**

Fue James Watt, un ingeniero escocés del siglo XVIII, quien observó que se podría utilizar el vapor como una fuerza económica que reemplazaría la fuerza animal y manual, empezó a desarrollar la fabricación de calderas de vapor. Las primeras calderas tenían el inconveniente que se aprovechaba mal el vapor, así que el primer cambio que hicieron fue introducir tubos, para aumentar la superficie de calefacción. Como ya se mencionó que, si por el interior de los tubos circulan gases o fuego, se les clasifican en calderas pirotubulares, y si lo que circula es agua se llaman calderas acuotubulares.

Luego en 1844 fueron desarrolladas las calderas tipo Lancashire, compuestas por un largo manto de acero, por lo general de 5 a 10 m. de largo, a través del cual pasaban 2 tubos de gran diámetro llamados fogones y se instalaba una cámara de combustión a la entrada de cada uno de ellos. Esta cámara podía ser diseñada para quemar gas, petróleo o carbón. Los fogones se encontraban rodeados por agua en su exterior y el calor que se generaba en la cámara de combustión era transferido al agua. Una de las desventajas era que después de repetidos calentamientos y enfriamientos, se deterioraban generando

infiltraciones de aire que desequilibraban el tiro de la caldera, y a la vez disminuía su eficiencia.

Sobre el año 1878 se diseñó la caldera Tipo Cochran cuya principal novedad fue la introducción de tubos horizontales en un manto cilíndrico vertical por medio de placas tubulares bridadas. Esta caldera fue vertical y la caja de humo formaba parte de ella apernada a un lado. En 1934 las calderas Cochran alcanzaron un acuerdo con Kirke, inventor de los famosos tubos Sinufflo, y lanzaron una línea de calderas horizontales recuperadoras de calor. Fueron muy exitosas, ideales para generar vapor a partir de gases calientes residuales provenientes de los procesos de las industrias del gas y del acero. En 1959 se lanzaron al mercado las calderas verticales Cochran Serie II con eficiencias térmicas y una gran producción de vapor para su tamaño. Su operación podía ser completamente automática, operando tanto con combustibles líquidos como sólidos.

La mejora en los materiales y en los procesos de fabricación se tradujo en que se podían instalar más tubos en cada unidad, surgiendo así la caldera paquete multitubular. Estas calderas se clasifican de acuerdo al número de pasos; es decir, de acuerdo al número de veces que los productos de combustión calientes pasan a través de la caldera. El diseño más común corresponde a las calderas de tres pasos, siendo el primero de ellos la cámara de combustión y los dos siguientes los pasos a través de los tubos. Años más tarde surgen las calderas de llama reversa donde la cámara de combustión tiene la forma de un dedal; el quemador está instalado en su extremo abierto normalmente

por debajo del centro. La llama retorna sobre sí misma dentro de la cámara de combustión para volver hacia el frente de la caldera. Los tubos de humo rodean el dedal y permiten el paso de los productos de combustión calientes a la parte trasera de la caldera y a la chimenea.

Para finales del Siglo XX diferentes ingenieros comienzan a desarrollar las calderas de biomasa que cumplen con un número de principios técnicos que conducen a una combustión completa, con bajas emisiones, alta eficacia y que utilizan como combustible la biomasa, o sea, residuos de materia orgánica que son combustibles renovables, como ser: pellets, huesos de aceitunas, cáscaras de almendras y nueces, restos de podas, leña de árboles secos, etc. En estos tiempos las calderas de biomasa son las más utilizadas en todos los ámbitos industriales y domésticos porque tienen las ventajas de utilizar combustibles más económicos y generosos con el medio ambiente.

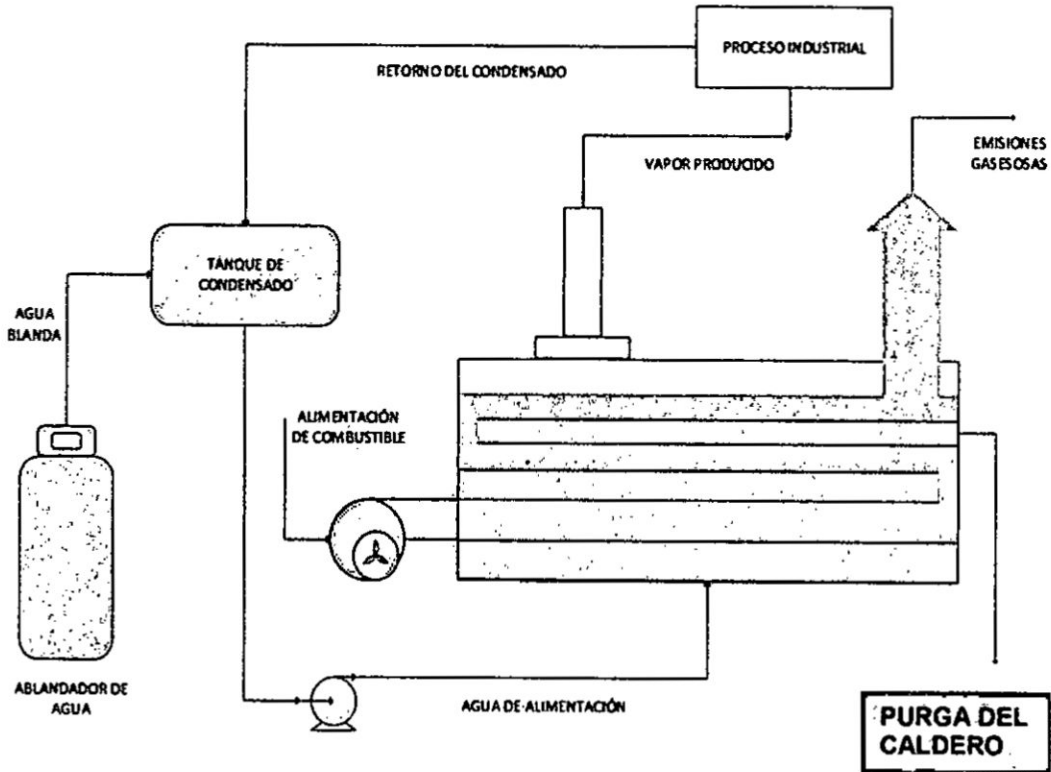
#### **2.2.2.2 Funcionamiento y aplicaciones del caldero en la actualidad**

Siendo un caldero todo aparato de presión donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable ya sean petróleo, gas natural, biomasa entre otros; a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

La caldera es un caso particular en el que se eleva a altas temperaturas un set de intercambiadores de calor, en la cual se

produce un cambio de fase. Además, es recipiente de presión, por lo cual es construida en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas.

**Figura 2.5**  
Esquema de un sistema generación de vapor



Fuente: Elaboración propia"

Debido a las amplias aplicaciones que tiene el vapor, principalmente de agua, la caldera es muy utilizada en la industria, a fin de generarlo para aplicaciones como:

- Esterilización: común de los calderos en los hospitales, los cuales generan vapor para "esterilizar" el instrumental médico; también en los comedores, con capacidad industrial, se genera vapor para

- **pH:** Representa las características ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH).
- **Dureza:** La dureza del agua cuantifica principalmente la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, los que favorecen la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera.
- **Oxígeno:** El oxígeno presente en el agua favorece la corrosión de los componentes metálicos de una caldera. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión.
- **Hierro y cobre:** El hierro y el cobre forman depósitos que deterioran la transferencia de calor. Se pueden utilizar filtros para remover estas sustancias.
- **Dióxido de carbono:** El dióxido de carbono, al igual que el oxígeno, favorecen la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y no de tubérculos como los resultantes de la corrosión por oxígeno. La corrosión en las líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono. El  $\text{CO}_2$  se disuelve en agua (condensado), produciendo ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido

carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal.

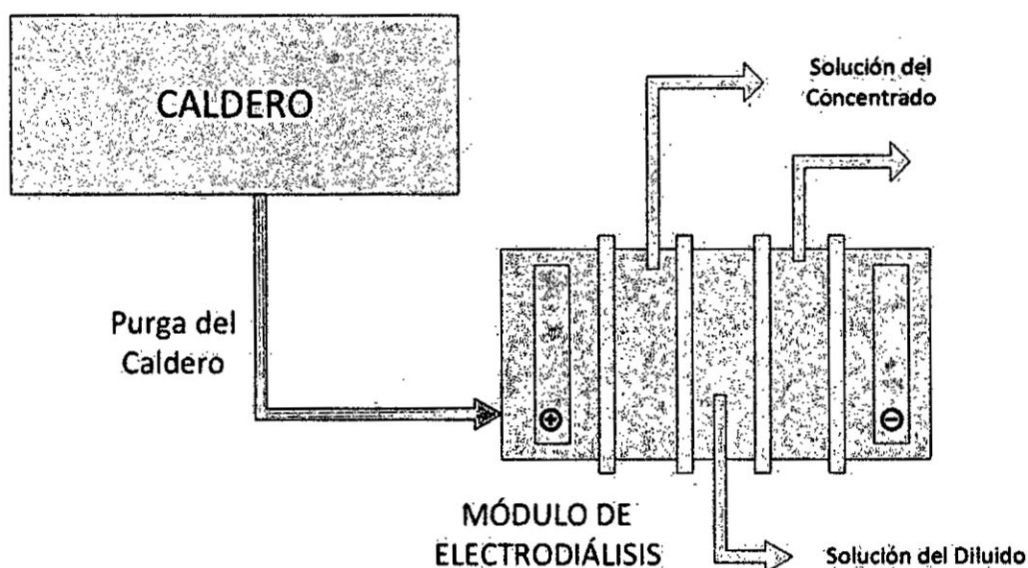
- **Aceite:** El aceite favorece la formación de espuma y como consecuencia el arrastre al vapor.
- **Fosfato:** El fosfato se utiliza para controlar el pH y dar protección contra la dureza.
- **Sólidos disueltos:** Los sólidos disueltos la cantidad de sólidos (impurezas) disueltas en el agua.
- **Sólidos en suspensión:** Los sólidos en suspensión representan la cantidad de sólidos (impurezas) presentes en suspensión (no disueltas) en el agua.
- **Secuestrantes de oxígeno:** Los secuestrantes de oxígeno corresponden a productos químicos (sulfitos, hidrazina, hidroquinona, etc.) utilizados para remover el oxígeno residual del agua.
- **Sílice:** La sílice presente en el agua de alimentación puede formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio).
- **Alcalinidad:** Representa la cantidad de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua. La alcalinidad del agua de alimentación es importante, ya que, representa una fuente potencial de depósitos.



- **Conductividad eléctrica:** La conductividad del agua permite controlar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua.

Para el presente proyecto de tesis se plantea el tratamiento del agua de purga de un caldero mediante un módulo de electrodiálisis el cual sería esquematizado en el siguiente diagrama:

**Figura 2.6**  
Esquema de aplicación del módulo de electrodiálisis para tratar el agua de purga de un caldero



Fuente: Elaboración propia"

Según las recomendaciones de la Norma Británica BS – 2486, la ABMA (American Boiler Manufacturing Association) se muestra la calidad del agua de una caldera para prevenir incrustaciones y corrosión en calderas de baja presión (hasta 10 bar), la cual es de las más aplicadas en la industria peruana.

**Tabla 2.1**

Parámetros óptimos de calidad de agua interna para un caldero con  
P < 10 Bar

PARAMETROS	VALORES RECOMENDADOS
pH a 25 °C	10.5 – 11.8
Alcalinidad Total CaCO <sub>3</sub>	< 700 ppm
Alcalinidad Cáustica	> 350 ppm
Secuestrantes de Oxígeno: <ul style="list-style-type: none"><li>• Sulfito de Sodio</li><li>• Hidrazina</li><li>• Taninos</li></ul>	30 – 70 ppm 0.1 – 10 ppm 120 – 180 ppm
Fosfato Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	30 - 60 mg/l
Hierro	< 3.0 ppm
Sílice	150 ppm
Sólidos disueltos	< 3500 ppm
Sólidos en suspensión	< 200 ppm
Conductividad eléctrica	< 7000 uS/cm
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles

Fuente: THERMAL Engineeing LTDA. - Chile: "Tratamiento del agua para calderas"

**Tabla 2.2**

Parámetros óptimos de calidad de agua para la alimentación de un caldero con P < 10 Bar

PARAMETROS	VALORES RECOMENDADOS
pH a 25 °C	8.0 – 9.5
Alcalinidad Total CaCO <sub>3</sub>	< 120 ppm
Dureza Total	<2 ppm
Oxígeno:	<8 ppb
Hierro	< 0.05 ppm
Sólidos disueltos	< 800 ppm
Conductividad eléctrica	< 1600 uS/cm
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles

Fuente: THERMAL Engineeing LTDA. - Chile: "Tratamiento del agua para calderas"

#### **2.2.2.4 Problemas dentro de los calderos industriales debido a su agua interna**

Los calderos en general presentan problemas internos de 2 tipos debido a su origen:

- Problemas internos en el sistema de combustión
- Problemas internos en el sistema de agua

## **b) Corrosión caustica**

Este problema se genera al sobreconcentrarse sales alcalinas e iones alcalinizantes como  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  u  $\text{OH}^-$ ; en las zonas con mayor carga térmica de la cámara de agua como la placa trasera o el fogón. Produciéndose la erosión sobre el hierro interno.

**Figura 2.8**  
Corrosión caustica



**Fuente:** THERMAL Engineereing LTDA. - Chile: "Tratamiento del agua para calderas"

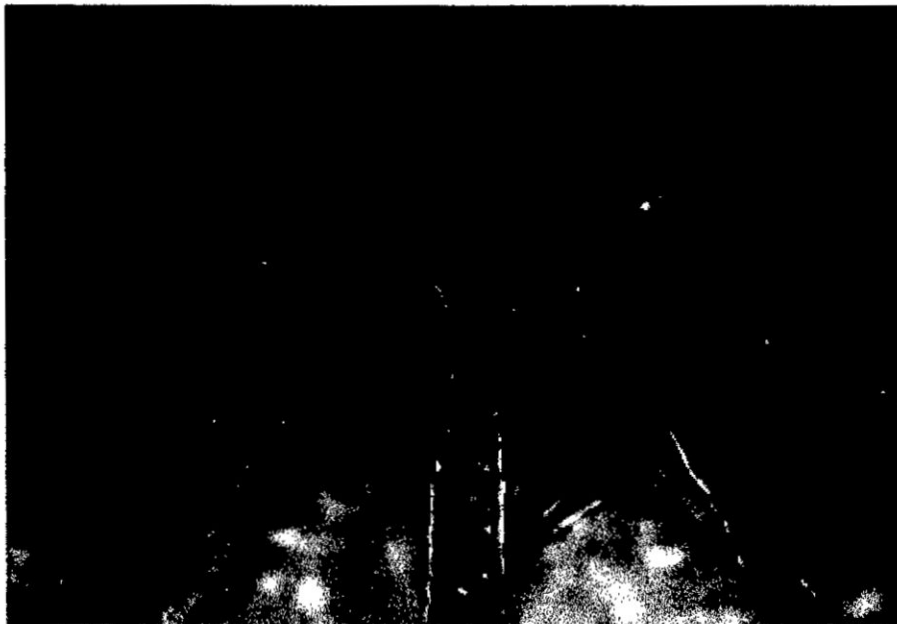
La corrosión caustica se puede prevenir mediante un correcto control de la calidad interna del agua, manteniendo los parámetros de pH y alcalinidad dentro de los rangos recomendados.

## **c) Incrustación**

Este problema se produce al depositarse sobre las superficies de los tubos internos sales duras como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{MgCO}_3$  entre

otros. En primer lugar; las sales duras poseen una alta resistencia térmica produciendo por ende un mayor consumo de combustible para generar vapor. A largo plazo, al engrosar las capas de caliche se producen daños por sobrecalentamiento dentro de la estructura interna del caldero. En un caso extremo se puede llegar al embancamiento del caldero llegándose a acumular en los fondos del caldero y obstruyendo las válvulas de purga. Esto es sumamente riesgoso pues puede explotar el caldero.

**Figura 2.9**  
Incrustación sobre los tubos internos



**Fuente:** THERMAL Engineeing LTDA. - Chile: "Tratamiento del agua para calderas"

Esto se puede evitar con un correcto régimen de ablandamiento del agua como pretratamiento del agua para la alimentación del caldero, dosificando productos químicos dispersantes o antincrustantes y con un eficiente control de las purgas del caldero.

### 2.3 Definición de términos usados

Algunos términos que será útil definir son:

**Ablandador de agua:** Equipos cuya función es eliminar los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , que conforman la dureza del agua y favorecen la formación de incrustaciones dentro de la caldera.

**Agua blanda:** Agua en la que se encuentran disueltas mínimas cantidades de sales duras, como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  o  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ .

**Anión:** Especie iónica negativa que migra hacia el cátodo por efecto de un campo eléctrico.

**Ánodo:** Electrodo hacia donde migran los aniones y en donde se da la oxidación de una especie química.

**Calor latente:** Energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido o de líquido a gaseoso. Se debe tener en cuenta que esta energía en forma de calor se invierte para el cambio de fase y no para un aumento de la temperatura.

**Calor latente de vaporización:** Energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase de líquido a gaseoso. Aprovechado en diferentes procesos industriales.

**Catión:** Especie iónica positiva que migra hacia el cátodo por efecto de un campo eléctrico.

**Cátodo:** Electrodo hacia donde migran los cationes y en donde se da la reducción de una especie química.

**Corriente eléctrica:** Flujo de cargas consecuencia del movimiento de cargas eléctricas debido a un voltaje.

**Membrana aniónica:** Lámina elaborada de un polímero que permite el paso preferente de los aniones, en particular del anión tartrato; posee carga positiva.

**Membrana catiónica:** Lámina elaborada de un polímero que permite el paso preferente de los cationes, en particular de los cationes:  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ; posee carga negativa.

**Membrana de electrodiálisis:** Pared delgada, densa e insoluble; constituida por un material polímero permeable a los iones que, colocada entre dos soluciones, permite una transferencia selectiva de iones de una solución hacia la otra, bajo la acción de un campo eléctrico.

**Potencial eléctrico:** El trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva desde dicho punto hasta el punto de referencia, dividido por unidad de carga de prueba. Dicho de otra forma, es el trabajo que debe realizar una fuerza externa para traer una carga positiva unitaria  $q^+$  desde el punto de referencia hasta el punto considerado en contra de la fuerza eléctrica a velocidad constante.

**Purga de caldero:** Agua interna de un caldero que debe eliminarse de este, para no sobresaturar la concentración de los productos químicos que se introducen a través del agua de alimentación. No hacerlo puede motivar que el sistema de la

caldera sufra la formación de incrustaciones, corrosión, metal agrietado y quebradizo, arrastre de sólidos y espuma.

**Solución de concentrado:** Dilución con alta concentración de sales, en la que el proceso de electrodiálisis ha acumulado las distintas sales que se lograron eliminar de un agua a tratar mediante este proceso.

**Solución de diluido:** Dilución con baja concentración de sales, en la que el proceso de electrodiálisis ha retirado las distintas sales que se lograron eliminar de un agua a tratar mediante este proceso.

**Retorno de condensado:** Agua de baja salinidad que se produce al condensarse el vapor generado al perder su calor latente de vaporización durante el proceso productivo.



			para calderos industriales.
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>METODO</b>
El potencial eléctrico para la operación de un módulo de electrodiálisis para desmineralizar el agua de purga de un caldero.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencial eléctrico - <math>\Delta V</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltios - v</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayos experimentales de electrodiálisis a diversos voltajes.</li> </ul>
La conductividad eléctrica inicial en el agua de la purga de un caldero que va a ser desmineralizada usando un módulo de electrodiálisis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductividad eléctrica inicial - <math>K_0</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Micro siemens por centímetro - <math>\mu S/cm</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medición de la conductividad eléctrica inicial en el agua en diversas muestras de purga de caldero.</li> </ul>
El flujo de alimentación del agua de la purga de un caldero que va a ser desmineralizada por un módulo de electrodiálisis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal de alimentación del proceso. - <math>\tilde{V}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mililitros por minuto - mL/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayos experimentales de electrodiálisis a diversos caudales de alimentación.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

## **CAPITULO IV**

### **METODOLOGÍA**

La metodología que se usó para concretar la investigación de la tesis es la siguiente:

#### **4.1 Tipo de investigación**

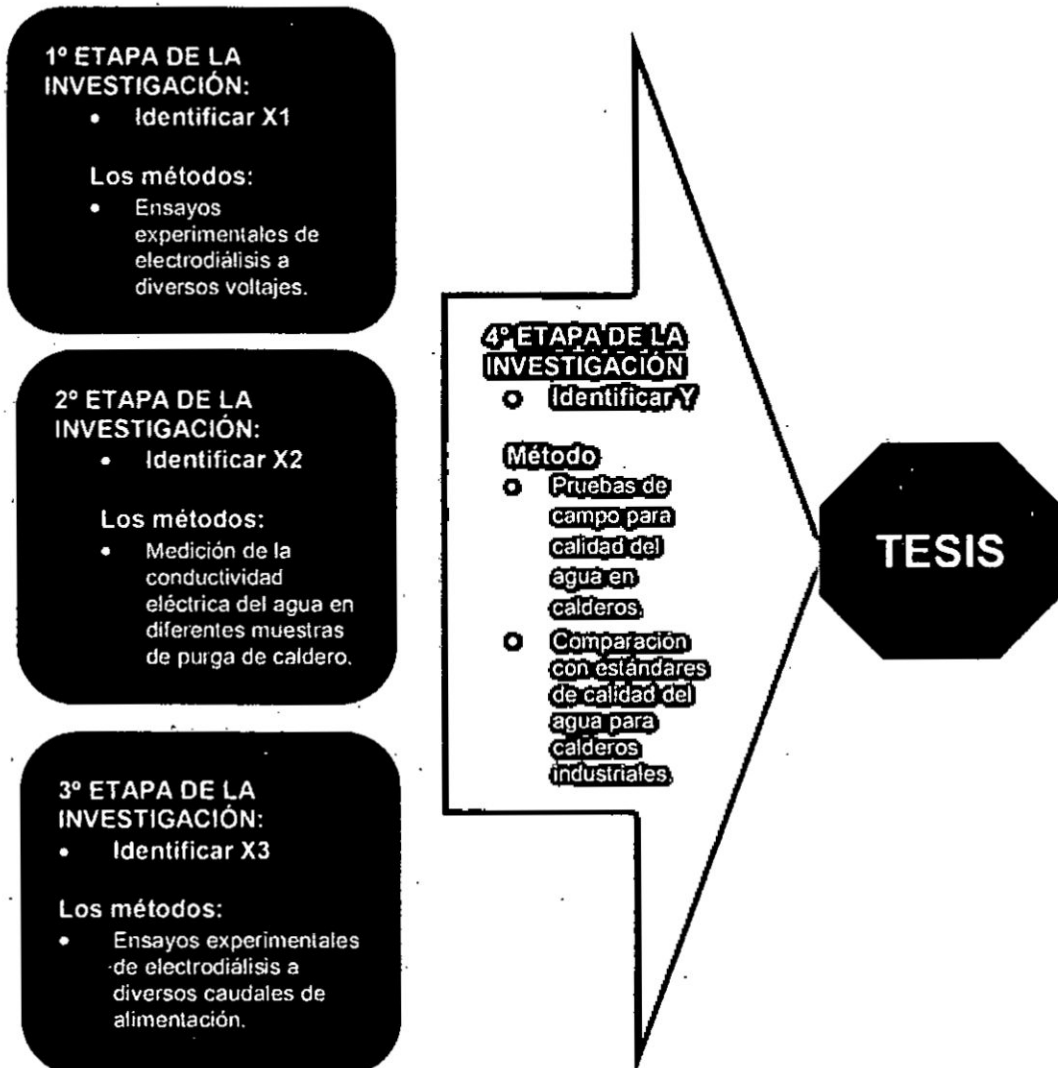
Los tipos de investigación que se realizó en el presente trabajo de tesis son:

- a) Tipo exploratoria, por su finalidad; ya que se buscó identificar nuevos rumbos para la investigación en campos del conocimiento poco estudiados.
- b) Tipo experimental, por su diseño interpretativo; ya que se manipuló las variables de proceso para lograr el efecto deseado.
- c) Tipo Cuantitativa, por el énfasis de la naturaleza de los datos manejados, siendo las variables de operación también cuantitativas.

#### **4.2 Diseño de la investigación**

El diseño que se ha considerado para la presente investigación se muestra en el siguiente diagrama:

**Figura 4.1**  
Etapas de investigación



Fuente: Elaboración propia"

### 4.3 Población y Muestra

La población está representada por el volumen de agua de purga de caldero industrial pirotubular acopiado con distintas calidades de agua de diversas empresas industriales, los cuales fueron sometidas a un análisis de calidad de agua mediante pruebas de campo convencionales, con las que a nivel industrial

se realizan los diagnósticos de estado interno dentro de la cámara de agua de un caldero industrial.

Las muestras útiles para la presente investigación fueron seleccionadas de calderos industriales con las siguientes características:

- Un régimen de operación de 24h diarias durante un mínimo de 5 días semanales.
- No habían sido sometidos a limpiezas químicas y si se hubiese practicado alguna hace no menos 3 meses.
- El agua fuente para estos calderos industriales eran aguas de pozos subterráneos aptos también para el consumo humano o de ganado, o previamente potabilizado; o proveniente de la red pública de abastecimiento de agua. Según el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano – DS N° 031 – 2010 – SA.
- El pretratamiento del agua de alimentación para estos equipos era de buena calidad.
- Se conocía previamente que las empresas propietarias de los calderos industriales tenían buenos estándares de control y mantenimiento de estos calderos.

Estas consideraciones se tomaron para la selección de las muestras para evitar en lo mejor posible, que posean concentraciones significativas de componentes que son considerados contaminantes como metales pesados; u compuestos disueltos producto de la corrosión en el agua interna del caldero.

Las muestras fueron tomadas de los distintos calderos industriales de diversas empresas como:

- INPELSA, Inversiones Pecuarias Lurín SA – Industria Cármica
- PROTISA, Productos Tissue SA – Industria Papelera
- Camal Frigorífico Lurín SAC – Industria Cármica
- Corporación Dulcito – Industria Alimentaria
- ICATOM, Ica Tomate – Industria Alimentaria

Se tomó una muestra de cada caldero industrial pirotubular en la cantidad de 10L, para cada corrida experimental se usó 4L y lo demás en analizar los parámetros de operación del módulo de electrodiálisis.

#### **4.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

En la presente tesis se aplicó lo siguiente:

##### **4.4.1 Técnicas a utilizar**

Las técnicas que se utilizaron para la recolección de datos:

- Medición y registro de potencial eléctrico en cada ensayo experimental
- Medición y registro del flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis

- Medición y registro de la conductividad eléctrica durante diversos tiempos dentro de 250 minutos de operación del módulo de electrodiálisis.
- Análisis por el método de Taguchi para la interrelación de 3 variables durante los ensayos experimentales a 3 niveles.
- Cada prueba experimental se hará por duplicado para poder corroborar el resultado obtenido, teniéndose así 2 rondas de pruebas experimentales

#### **4.4.2 Equipos e instrumentos a utilizar**

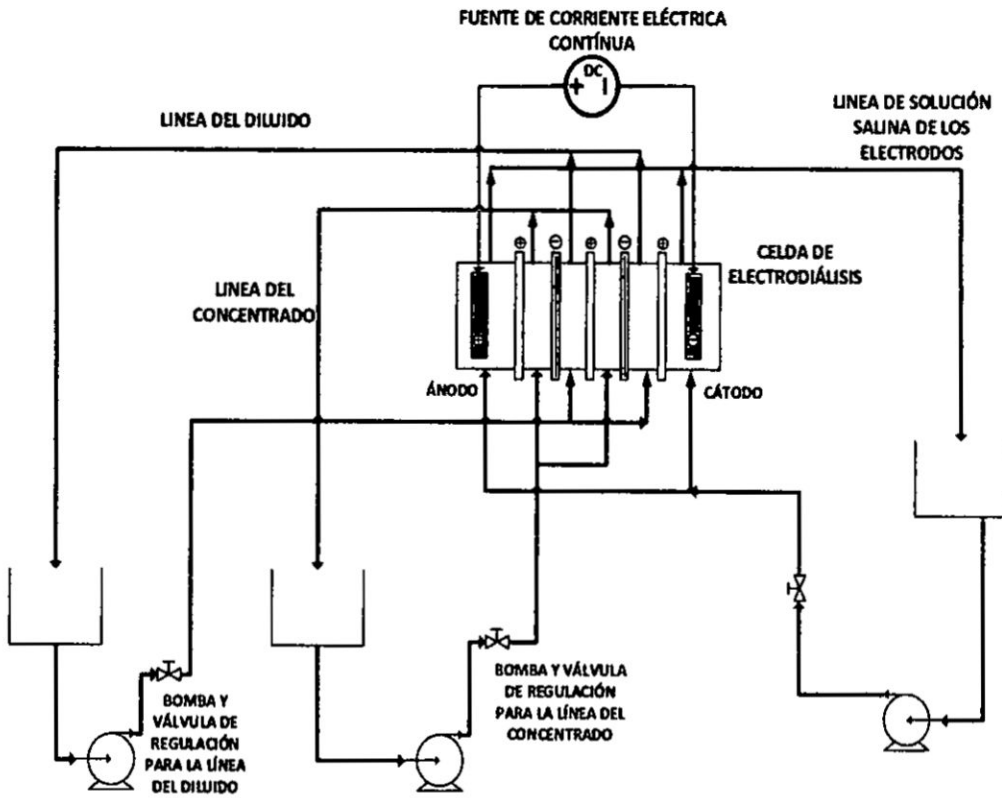
En esta investigación se utilizaron de una manera diferenciada:

- Módulo de electrodiálisis
- Pruebas de campo para la calidad del agua
- Instrumentos de medición

##### **4.4.2.1 Módulo de electrodiálisis**

Este es el principal equipo para esta investigación y tiene las siguientes características a modo general:

**Figura 4.2**  
Esquema del módulo de electrodiálisis

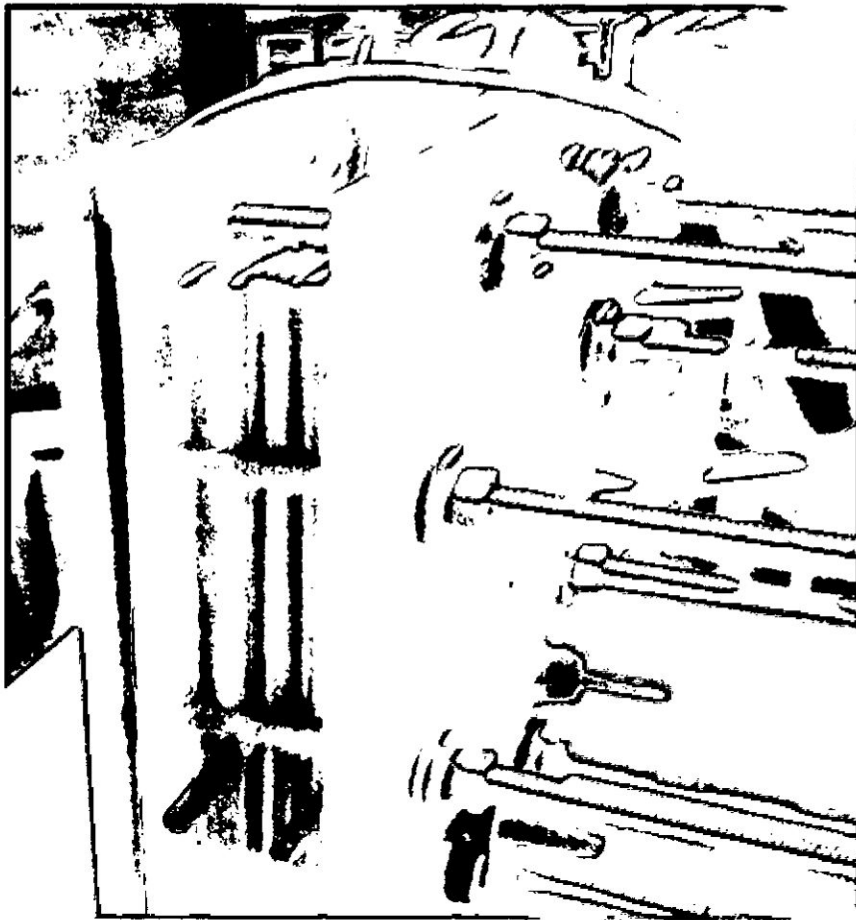


Fuente: Elaboración propia"

El módulo de electrodiálisis está compuesto por las siguientes partes:

- Celda de electrodiálisis
- 3 cámaras de acrílico para agua con 1.5L de capacidad
- 3 bombas magnéticas de serie 6800 – Marca lwaki
- Soporte de estructura metal y madera
- Fuente de alimentación eléctrica continua Instek de 0 a 30v
- Mangueras plásticas de 1/2in
- 3 transformadores eléctricos de 10W

**Figura 4.4**  
Vista de la celda de electrodiálisis



Fuente: Elaboración propia"

Así pues, el módulo de electrodiálisis estuvo acoplado, se le aplicó una limpieza con ácido HCl 0.001N, tanto en la celda como en el circuito de circulación.



**Tabla 4.3**  
Evolución de la corriente eléctrica a través del tiempo  
a cada voltaje

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Diferencia de potencial eléctrico (V) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Intensidad de corriente eléctrica (A) - I</b>
0	0	0
5	1	0,02
10	2	0,06
15	3	0,12
20	4	0,2
25	5	0,3
30	6	0,36
35	7	0,4
40	8	0,48
45	9	0,52
50	10	0,58
55	11	0,69
60	12	0,73
65	13	0,86
70	14	0,95
75	15	1,09
80	16	1,16
85	17	1,2
90	18	1,24
95	19	1,36
100	20	1,44
105	21	1,5
110	22	1,62
115	23	1,68
120	24	1,74
125	25	1,77
130	26	1,83
135	27	1,85
140	28	1,83
145	29	1,87
150	30	1,85

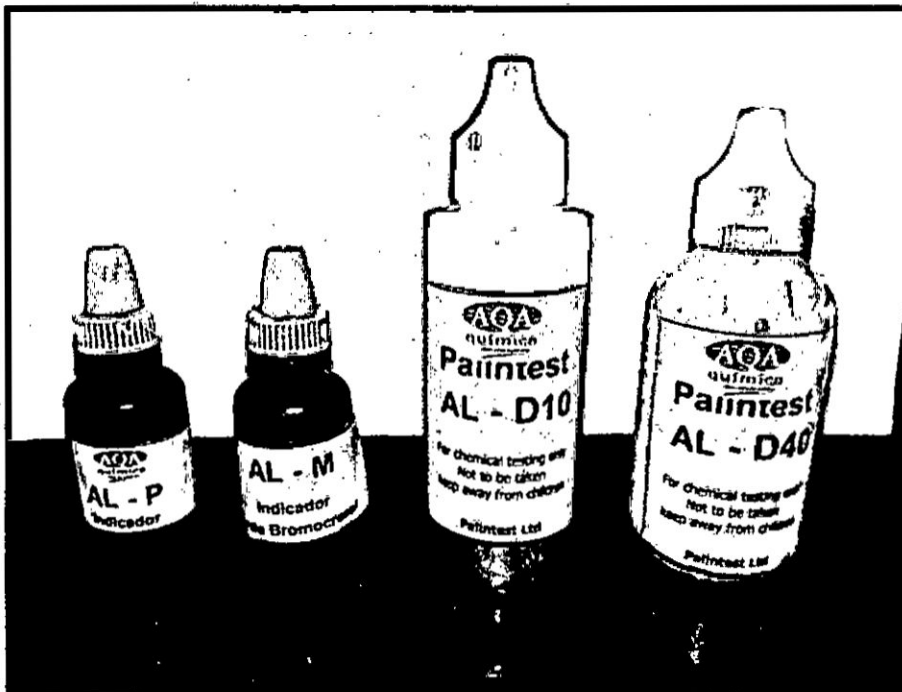
Fuente: Elaboración propia

ampliamente las pruebas de campo para informes y reportes oficiales con resultados satisfactorios para el control de los parámetros químicos en el agua interna de los calderos industriales.

Las pruebas de campo utilizadas fueron:

- Palintest® AL fieldtest HAVC Alkalinity

**Figura 4.6**  
Reactivos de la prueba de campo para medir alcalinidad

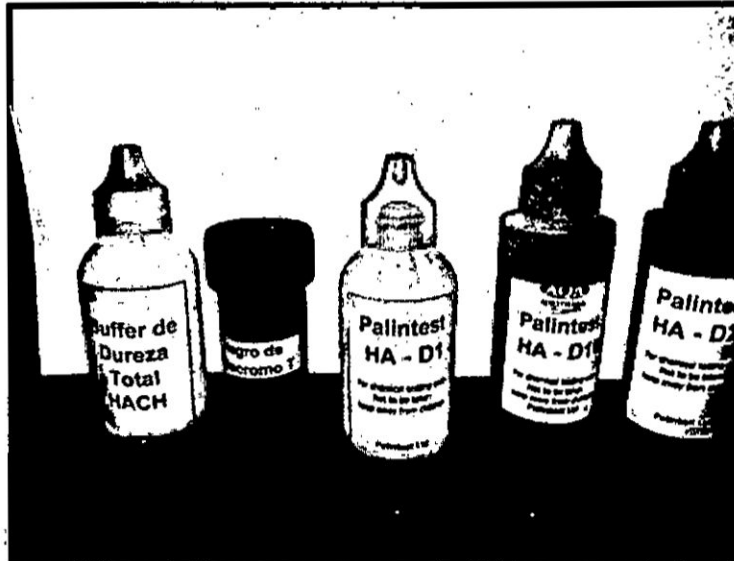


Fuente: Elaboración propia”

- Palintest® HA fieldtest HAVC Total Hardness

**Figura 4.7**

Reactivos de la prueba de campo para medir dureza total



Fuente: Elaboración propia"

- Palintest® CL fieldtest HAVC Cloride

**Figura 4.8**

Reactivos de la prueba de campo para medir cloruros

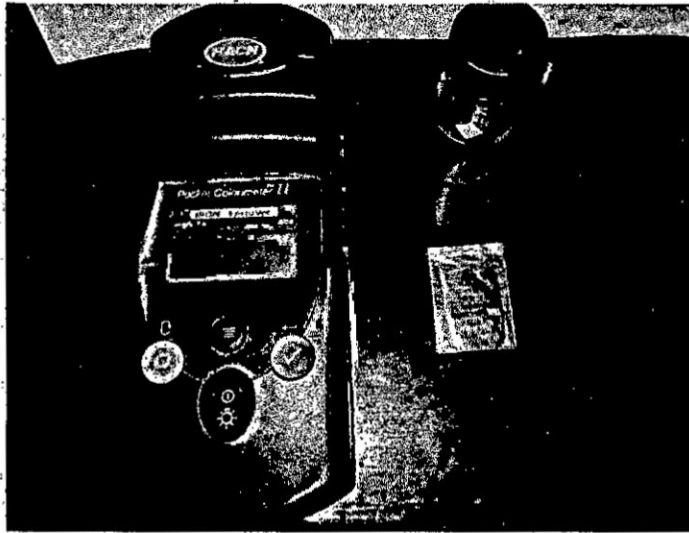


Fuente: Elaboración propia"

- Hach® fieldtester ferrometer

**Figura 4.9**

Reactivo, ferrómetro y celda de medición para medir hierro total



Fuente: Elaboración propia”

#### 4.4.2.3 Instrumentos de medición, herramientas y otros reactivos

Los instrumentos utilizados para esta investigación fueron:

- Conductímetro HACH® HQ101

**Figura 4.10**

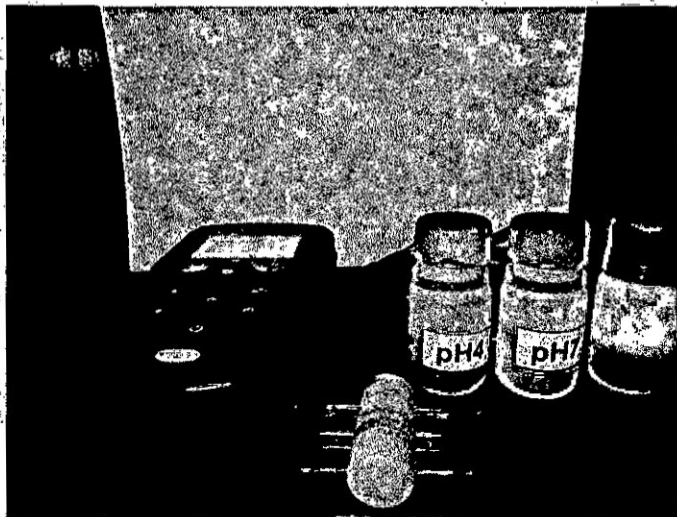
Conductímetro y su solución calibradora



Fuente: Elaboración propia”

- PH metro HACH® HS7

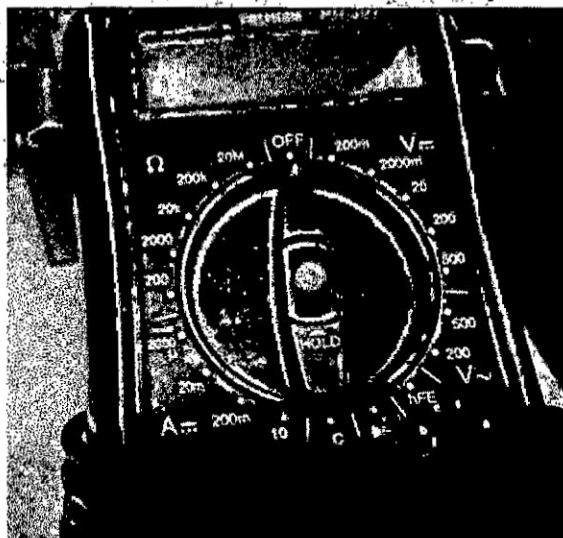
**Figura 4.11**  
PH metro y sus electrolitos calibradores



Fuente: Elaboración propia”

- Multímetro Prasek® Premium PR – 300

**Figura 4.12**  
Multímetro Prasek®



Fuente: Elaboración propia”

- 300g Sulfato de sodio sólido QP –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$
- 1L de Ácido clorhídrico al 36% -  $\text{HCl}$
- Cables con cocodrilos

- Baldes de 20L
- Vasos de precipitado
- Alicates, desarmadores
- Llave francesa Stanley 6in
- Cinta aislante 3M

#### 4.5 Plan de análisis estadístico de datos

Para el proceso de análisis se definieron las variables y los niveles para su interpretación:

**Tabla 4.4**  
Variables y niveles de investigación

Nº	VARIABLES	NOTACIÓN	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
1	El potencial eléctrico para la desmineralizar el agua de purga de un caldero empleando un módulo de electrodiálisis.	X1	X11	X12	X13
2	La calidad del agua de la purga de un caldero que va a ser desmineralizada empleando un módulo de electrodiálisis.	X2	X21	X22	X23
3	El flujo de alimentación módulo de electrodiálisis para desmineralizar al agua de purga de un caldero.	X3	X31	X32	X33

Fuente: Elaboración propia

Siendo así que como se mencionó que las pruebas experimentales se realizarían en 2 rondas experimentales teniendo entonces los siguientes arreglos, en base a las 9 muestras tomadas por cada ronda experimental:

**Tabla 4.7**  
Configuración de las pruebas para la 1° ronda experimental

Pruebas 1° Ronda	X1 - Voltaje (v)	X2 - Caudal de Operación (mL/min)	X3 -Conductividad Eléctrica inicial de la muestra ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	5	120	2910
2	5	150	5970
3	5	180	9120
4	10	120	5790
5	10	150	8980
6	10	180	3200
7	15	120	8260
8	15	150	3160
9	15	180	5850

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.8**  
Configuración de las pruebas para la 2° ronda experimental

Pruebas 2° Ronda	X1 - Voltaje (v)	X2 - Caudal de Operación (mL/min)	X3 -Conductividad Eléctrica inicial de la muestra ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1	5	120	3270
2	5	150	6120
3	5	180	9080
4	10	120	6070
5	10	150	9030
6	10	180	2920
7	15	120	9060
8	15	150	3130
9	15	180	6210

Fuente: Elaboración propia

Para todas las muestras se buscaron que sus conductividades eléctricas iniciales sean lo más cercanas posibles a lo planteado teóricamente.

#### **4.5.1 Estrategia de análisis estadístico**

Habiéndose ya obtenido los valores de cada experimento realizado se proseguirá con:

- Exploración de las variables y creación de variables transformadas o derivadas
- Análisis simple de relación
- Descripción de las variables
- Planteamiento de un modelo matemático
- Planteamiento de conclusiones

#### **4.5.2 Plan de Interrelación de Variables**

En la presente investigación se utilizó el Software Microsoft Excel 2016 en el procesamiento de los datos experimentales de los ensayos de electrodiálisis con las muestras de purga de un caldero, durante un tiempo estándar de 250 minutos de operación del módulo de electrodiálisis y mediante el mencionado software se graficarán los puntos registrados, en un Diagrama Conductividad Eléctrica VS Tiempo.

Posteriormente a estos datos experimentales se les realizarán un ajuste hiperbólico del tipo:



$$K = \frac{B \cdot t}{A + t} + K_0, \quad \text{donde A y B son coeficientes del ajuste hiperbólico}$$

$K_0$ : conductividad eléctrica inicial del efluente a purificar mediante el módulo de electrodiálisis

El ajuste hiperbólico nos permitirá obtener un modelo matemático con el cual podremos posteriormente proyectar el desempeño de la purificación de las muestras de purga de calderos.

# CAPITULO V

## RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados de las pruebas experimentales:

### 5.1 Resultados de la calidad del agua de las muestras de agua de purga de caldero

Empezamos reportando el estado inicial de la calidad del agua de las muestras de agua de purga de calderos siendo agrupadas en 2 rondas experimentales de 9 muestras cada una.

#### 5.1.1 Calidad del agua de las muestras de la 1° Ronda de pruebas experimentales

Se recogieron 9 muestras de agua de purga de caldero en distintas empresas cuya conductividad eléctrica se acerque lo más posible a las escogidas para el diseño de los experimentos.

**Tabla 5.1**  
Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis

MUESTRAS 1° Ronda	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	8980	9120	3200
TDS (ppm)	4490	4560	1600
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	54	86	6
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	1030	1110	530
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	900	750	420
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	770	390	310
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	2840	2950	860

Hierro Total (ppm Fe+3)	0,05	0,03	0,04
pH	12	11,85	11,05
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.2**  
Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis

MUESTRAS 1° Ronda	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	5850	8260	2910
TDS (ppm)	2926	4130	1455
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	13	56	4
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	660	1150	790
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	480	910	420
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	300	670	50
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	1130	1960	815
Hierro Total (ppm Fe+3)	0,06	0,06	0,02
pH	11,35	11,91	10,96
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.3**  
Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis

MUESTRAS 1° Ronda	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	5970	5790	3160
TDS (ppm)	2985	2895	1580
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	17	13	8
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	1080	1040	680
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	720	760	460
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	360	480	240
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	1065	985	875
Hierro Total (ppm Fe+3)	0,04	0,03	0,02

pH	10,47	11,72	10,12
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2 Calidad del agua de las muestras de la 2° Ronda de pruebas experimentales

Se recogieron nuevas 9 muestras de agua de purga de caldero en distintas empresas cuya conductividad eléctrica se acerque lo más posible a las escogidas para el diseño de los experimentos.

**Tabla 5.4**

Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis

MUESTRAS 2° Ronda	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	9030	9080	2920
TDS (ppm)	4515	4540	1460
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	66	62	9
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	1090	1070	610
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	920	890	390
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	750	710	170
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	1855	2130	650
Hierro Total (ppm $\text{Fe}^{+3}$ )	0,06	0,06	0,01
pH	12,05	11,41	11,34
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.5**

Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis

MUESTRAS 2° Ronda	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	9060	6210	6120
TDS (ppm)	4530	3105	3060
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	78	31	26
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	1260	1060	1030
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	960	640	820
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	660	220	610
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	1390	1260	1460

Hierro Total (ppm Fe+3)	0,05	0,02	0,04
pH	10,22	11,24	10,83
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.6**  
Muestras a purificar mediante electrodiálisis

MUESTRAS: 2° Ronda	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	3270	6070	3130
TDS (ppm)	1635	3055	1565
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	8	33	8
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	540	1090	750
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	390	630	480
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	240	170	210
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	710	1285	1215
Hierro Total (ppm Fe+3)	0,02	0,05	0,03
pH	10,43	10,83	10,05
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

Siendo así que podremos realizar 9 corridas experimentales con sus respectivos duplicados en los 3 niveles experimentales planteados.

## 5.2 Resultados de las pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se realizaron bajo 2 rondas aplicados a los 3 niveles experimentales y siendo la segunda ronda un duplicado de la primera para poder afianzar los resultados obtenidos; además se menciona que las pruebas experimentales no fueron hechas en un orden correlativo al planteado en el diseño de experimento (véanse, Tabla 4.7 y Tabla 4.8); si no a la disponibilidad de las muestras tomadas para la investigación.

## 5.2.1 Resultados de la 1° Ronda de pruebas experimentales

Los 9 experimentos de la 1° Ronda de corridas experimentales tuvieron como resultado.

### 5.2.1.1 Muestra N°1

Prueba experimental N°5 según el diseño de experimento. (Véase, Tabla 4.7)

**Tabla 5.7**  
Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis

Conductividad Eléctrica Inicial ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) - K0	8980
pH 0	12
Voltaje - $\Delta V$	10
Caudal Operación (mL/min) - V	150
Intensidad de corriente Inicial (A)	1,11
% Separación de Sales (%SS)	84,51%
Concentración Inicial (mg/L)	4490
Concentración Final Diluido (mg/L)	695.5
Concentración Final Concentrado (mg/L)	8970
Integral de la carga eléctrica ( $\text{A}^*\text{s}$ )	23424,375

Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

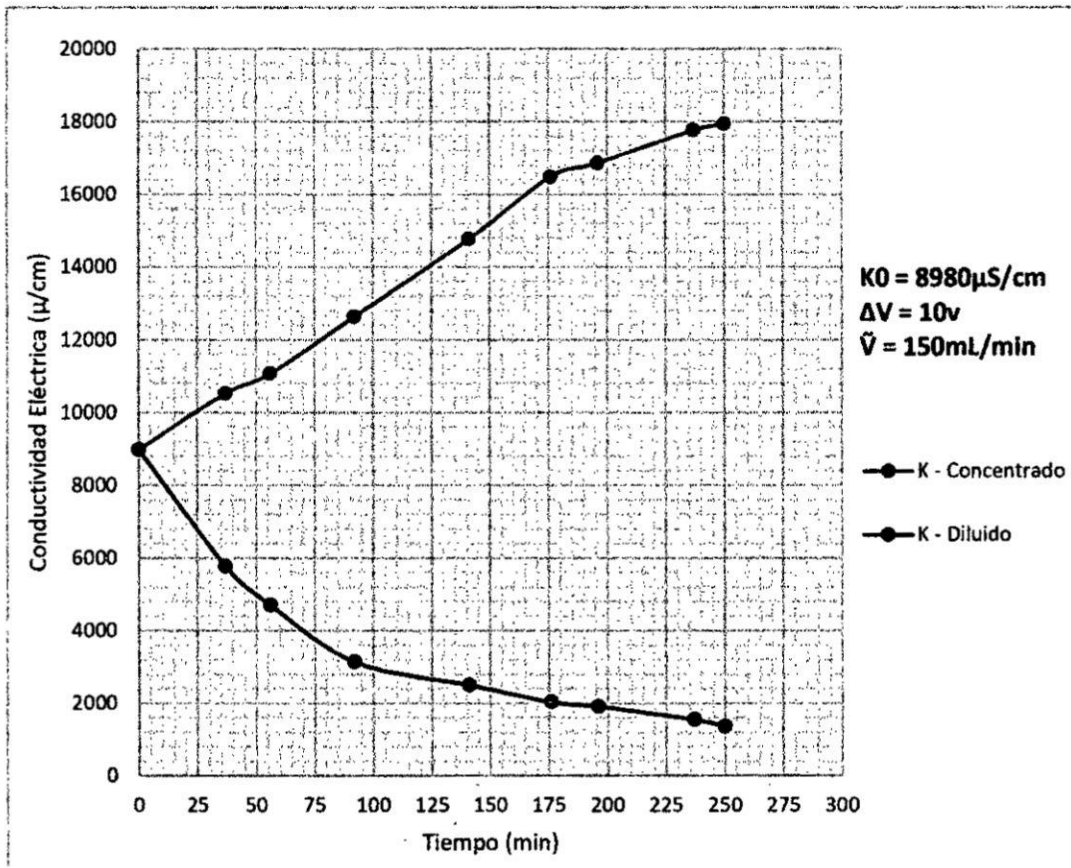
**Tabla 5.8**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 1		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH		K - Diluido	pH
0	0	8980	12	1,11	8980	12
1	37	10520	12,61	0,91	5770	11,55
2	56	11060	12,48	0,74	4710	11,07
3	92	12630	12,59	0,62	3140	10,95
4	141	14760	12,78	0,47	2500	10,88
5	176	16480	13,16	0,39	2030	10,72
6	196	16860	13,19	0,31	1910	10,66
7	237	17760	13,28	0,26	1543	10,44
8	250	17940	13,38	0,22	1391	10,34

Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado:

**Gráfica 5.1**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia



Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.9**  
Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	8980	8980
50	11081	5043
100	13095	3330
150	15028	2372
200	16885	1760
250	18670	1335
300	20387	1022
350	22040	783
400	23632	594

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(concentrado) = \frac{B * t}{A + t} + K_0$$

$$K^*(diluido) = \frac{B * t}{A + t} + K_0$$

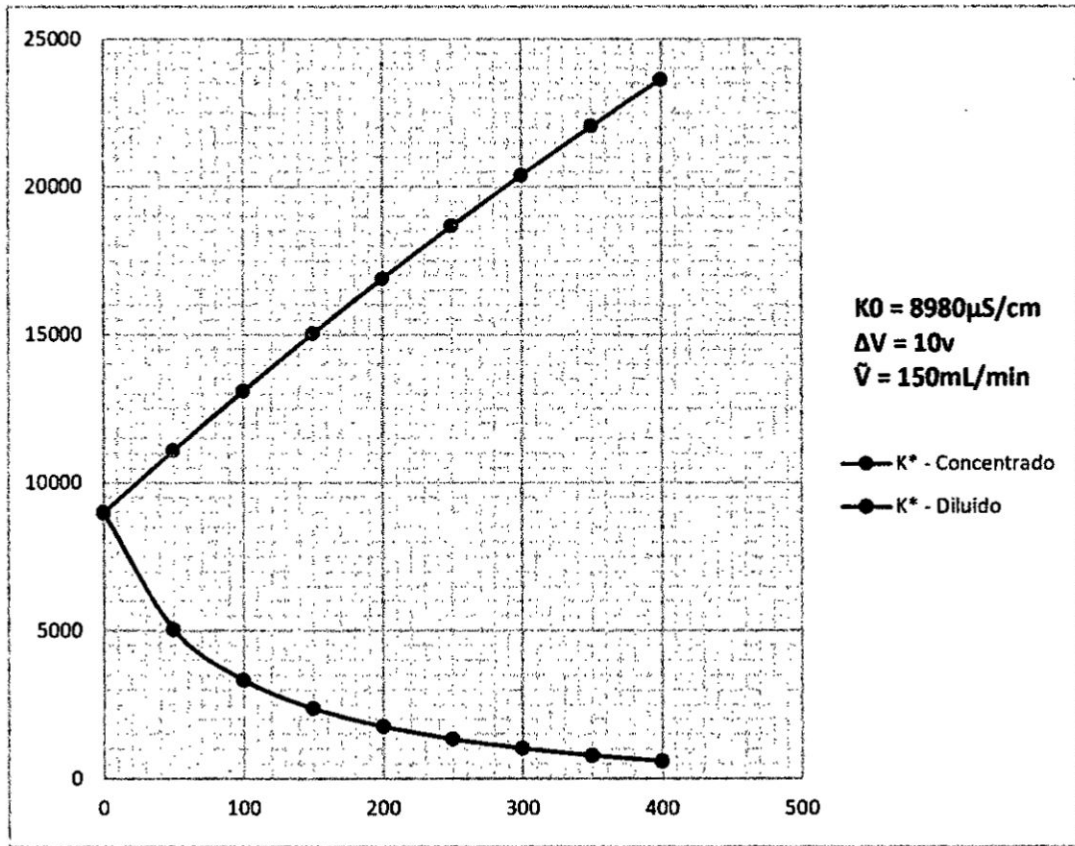
**Tabla 5.10**  
Coeficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	2330	77
B	100000	-10000
R <sup>2</sup>	0,9929	0,9936

Fuente: Elaboración propia

La proyección gráfica:

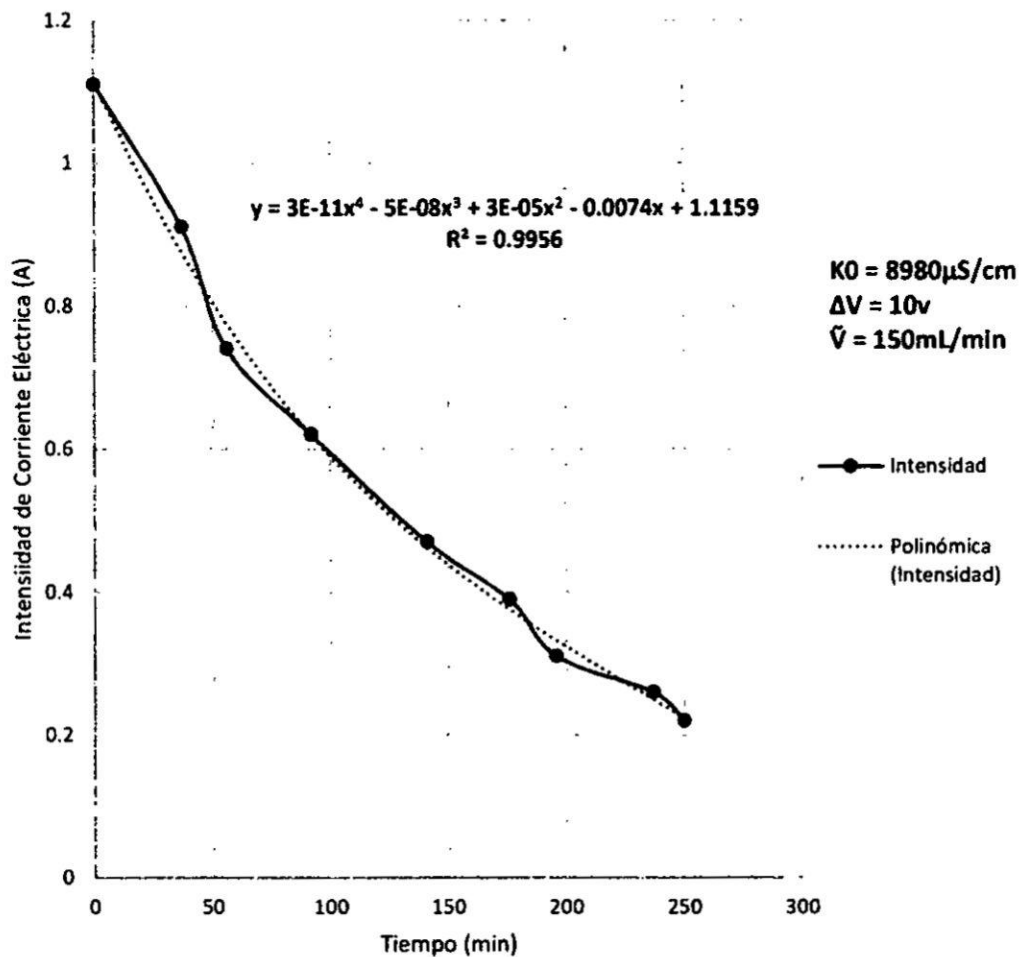
**Gráfica 5.2**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

La intensidad de corriente eléctrica respecto al tiempo se desarrolló:

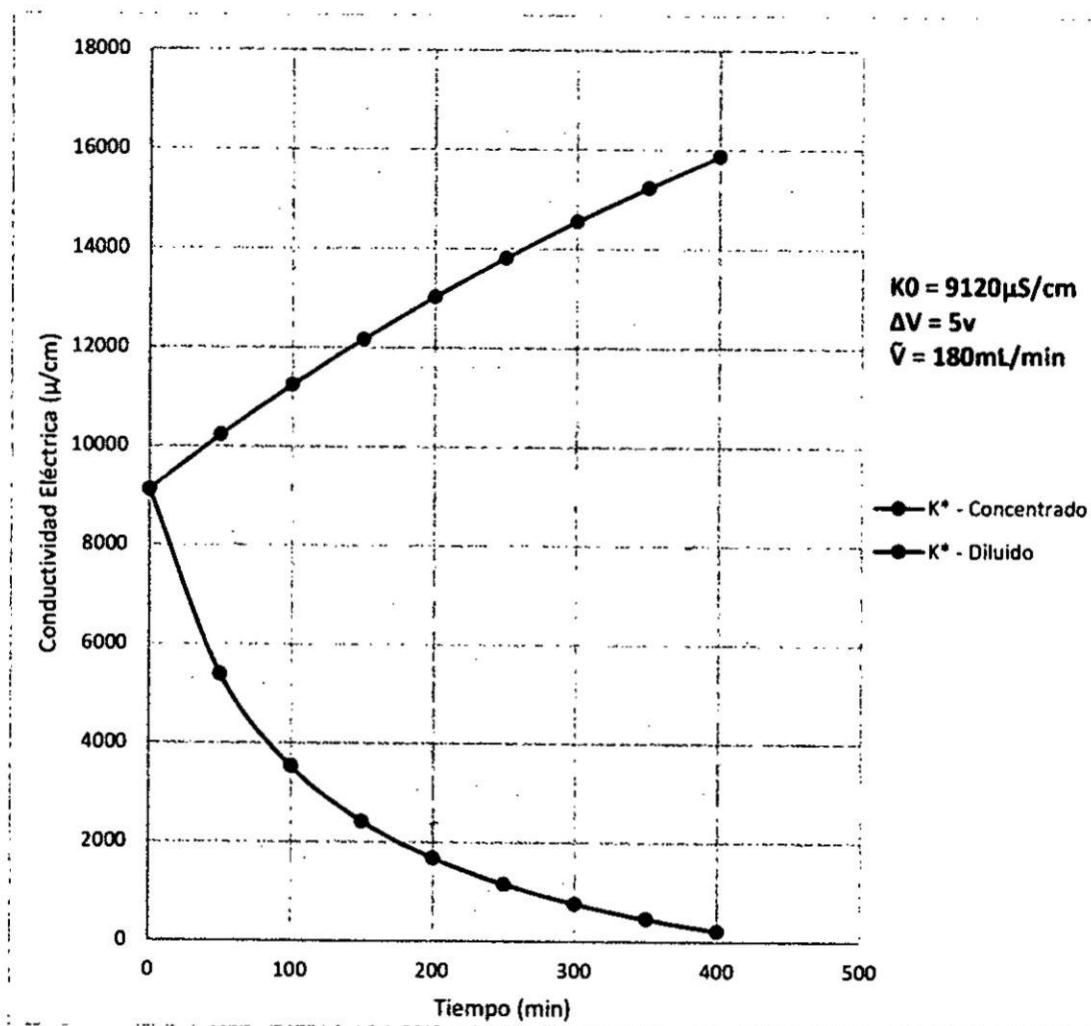
**Gráfica 5.3**  
Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

La proyección gráfica:

**Gráfica 5.5**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.17**  
Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	3200	3200
50	4422	2091
100	4842	1536
150	5054	1203
200	5182	980
250	5268	821
300	5329	702
350	5375	609
400	5411	535

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(concentrado) = \frac{B \cdot t}{A + t} + K_0$$

$$K^*(diluido) = \frac{B \cdot t}{A + t} + K_0$$

**Tabla 5.18**  
Coeficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	52.25	100.33
B	2500	-3333.33
R <sup>2</sup>	0,9993	0,9961

Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

**Tabla 5.20**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

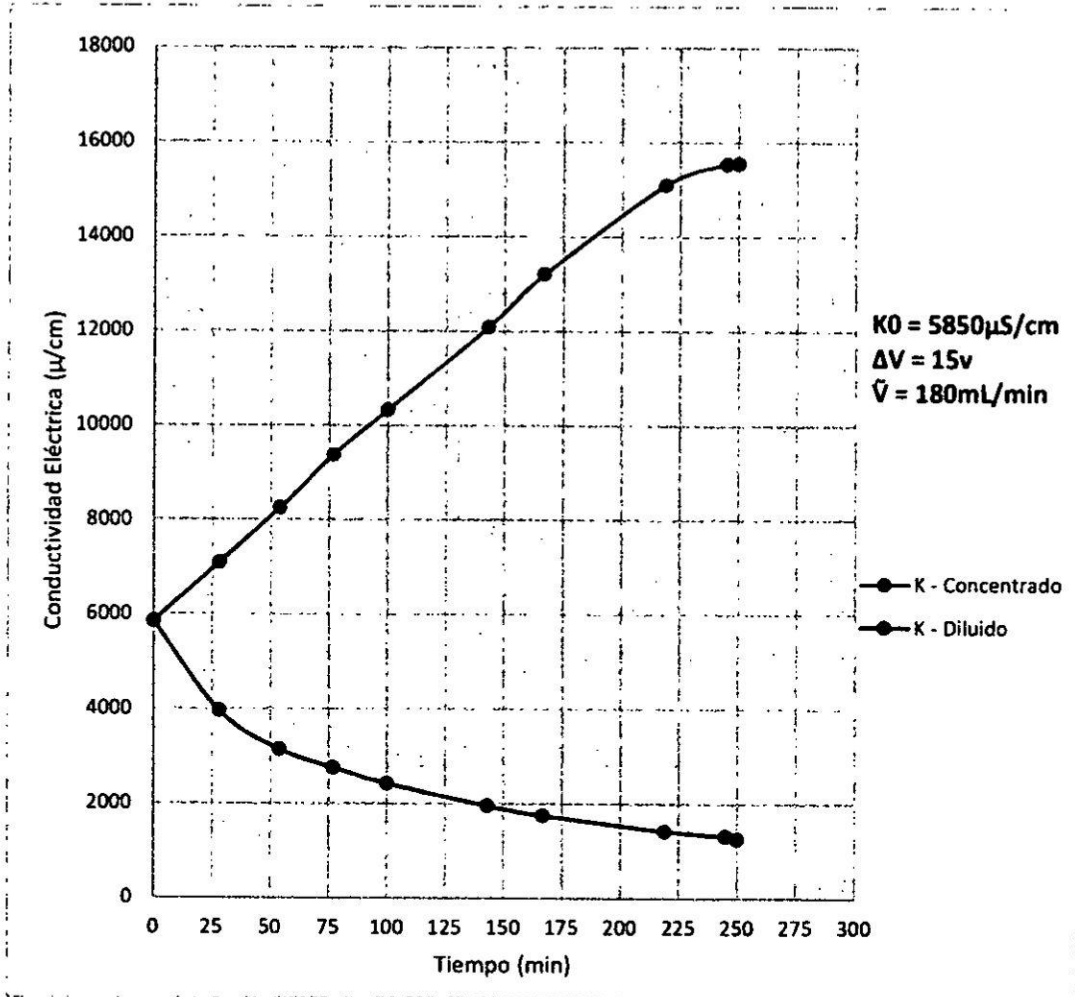
MUESTRA 4		TANQUE 1		Intensidad	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH	Corriente (A)	K - Diluido	pH
0	0	5850	11,35	1,05	5850	11,35
1	28	7090	11,45	1,01	3960	11,07
2	54	8250	11,92	0,98	3150	10,89
3	77	9380	12,09	0,84	2760	10,57
4	100	10330	12,22	0,71	2430	10,47
5	143	12080	12,37	0,56	1960	10,17
6	167	13200	12,45	0,49	1752	9,95
7	219	15100	12,58	0,29	1424	9,85
8	245	15540	12,77	0,26	1356	9,74
9	250	15550	12,97	0,26	1315	9,58

Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado:

**Gráfica 5.10**

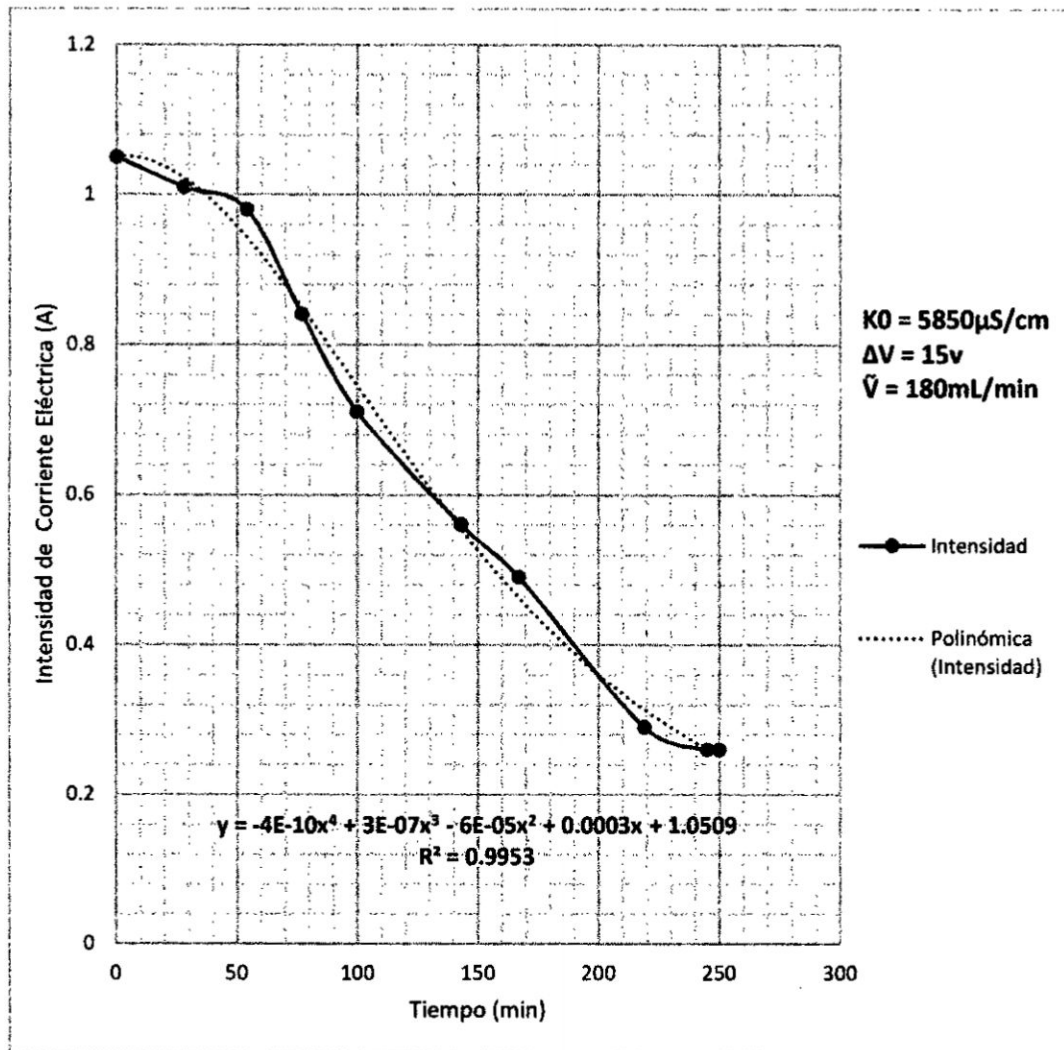
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

La intensidad de corriente eléctrica respecto al tiempo se desarrolló:

**Gráfica 5.12**  
Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia



### 5.2.1.5 Muestra N°5

Prueba experimental N°7 según el diseño de experimento. (Véase, Tabla 4.7)

**Tabla 5.23**  
Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis

Conductividad Eléctrica Inicial ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) - K0	8260
pH 0	11,91
Voltaje - $\Delta V$	15
Caudal Operación ( $\text{mL}/\text{min}$ ) - V	120
Intensidad de corriente (A)	1,54
% Separación de Sales (%S)	78,50%
Concentración Inicial ( $\text{mg}/\text{L}$ )	4130
Concentración Final Diluido ( $\text{mg}/\text{L}$ )	888
Concentración Final Concentrado ( $\text{mg}/\text{L}$ )	10460
Integral de la carga eléctrica ( $\text{A}\cdot\text{s}$ )	13021,18

Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

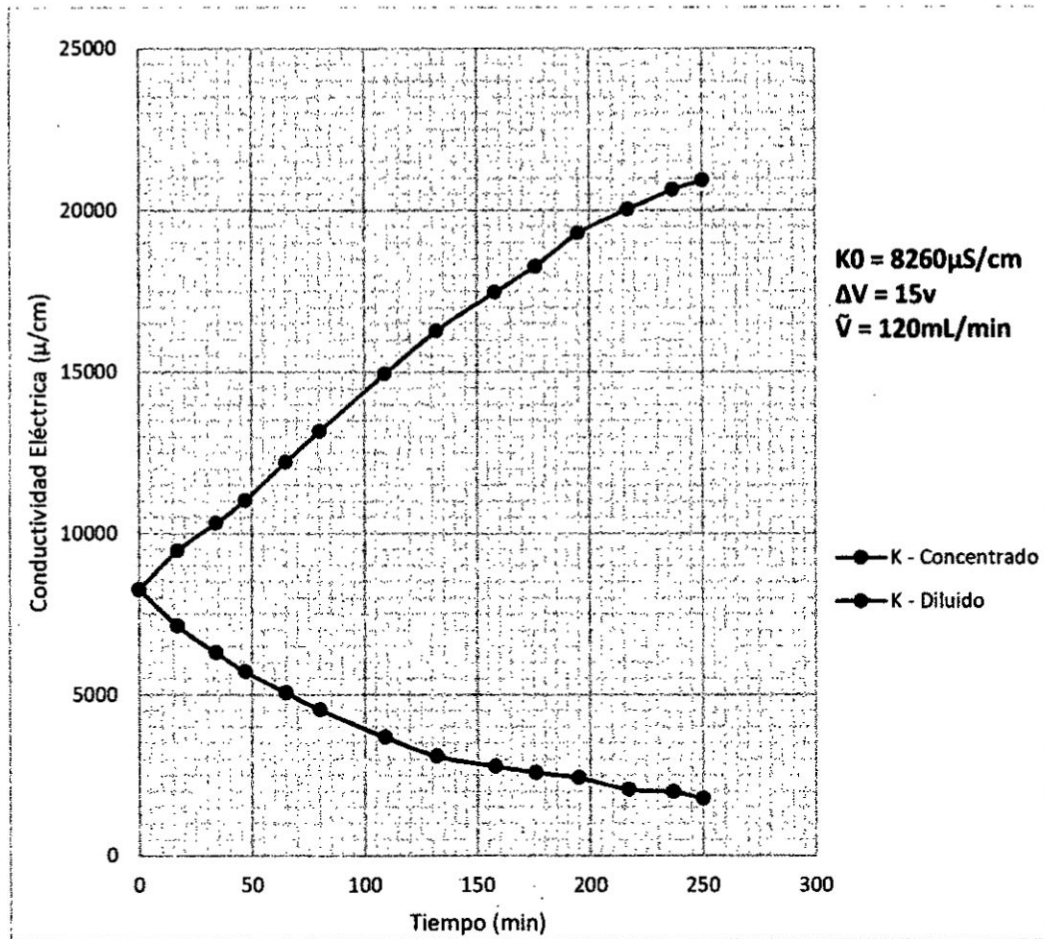
**Tabla 5.24**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 5		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH		K - Diluido	pH
0	0	8260	11,91	1,54	8260	11,91
1	17	9460	12,01	1,48	7130	10,75
2	34	10310	12,19	1,22	6300	10,46
3	47	11020	12,23	1,15	5720	10,28
4	65	12210	12,66	1,01	5060	10,08
5	80	13160	12,88	0,92	4540	9,98
6	109	14930	13,06	0,83	3676	9,76
7	132	16270	13,32	0,78	3090	9,69
8	158	17460	13,46	0,74	2780	9,49
9	176	18260	13,53	0,71	2590	9,32
10	195	19280	13,58	0,67	2420	9,24
11	217	20030	13,6	0,63	2060	9,07
12	237	20630	13,63	0,61	1978	8,97
13	250	20920	13,64	0,61	1776	8,86

Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado:

**Gráfica 5.13**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.25**  
Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	8260	8260
50	11445	5557
100	14074	4005
150	16281	2997
200	18161	2290
250	19781	1766
300	21191	1363
350	22430	1044
400	23527	783

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(\text{concentrado}) = \frac{B \cdot t}{A + t} + K_0$$

$$K^*(\text{diluido}) = \frac{B \cdot t}{A + t} + K_0$$

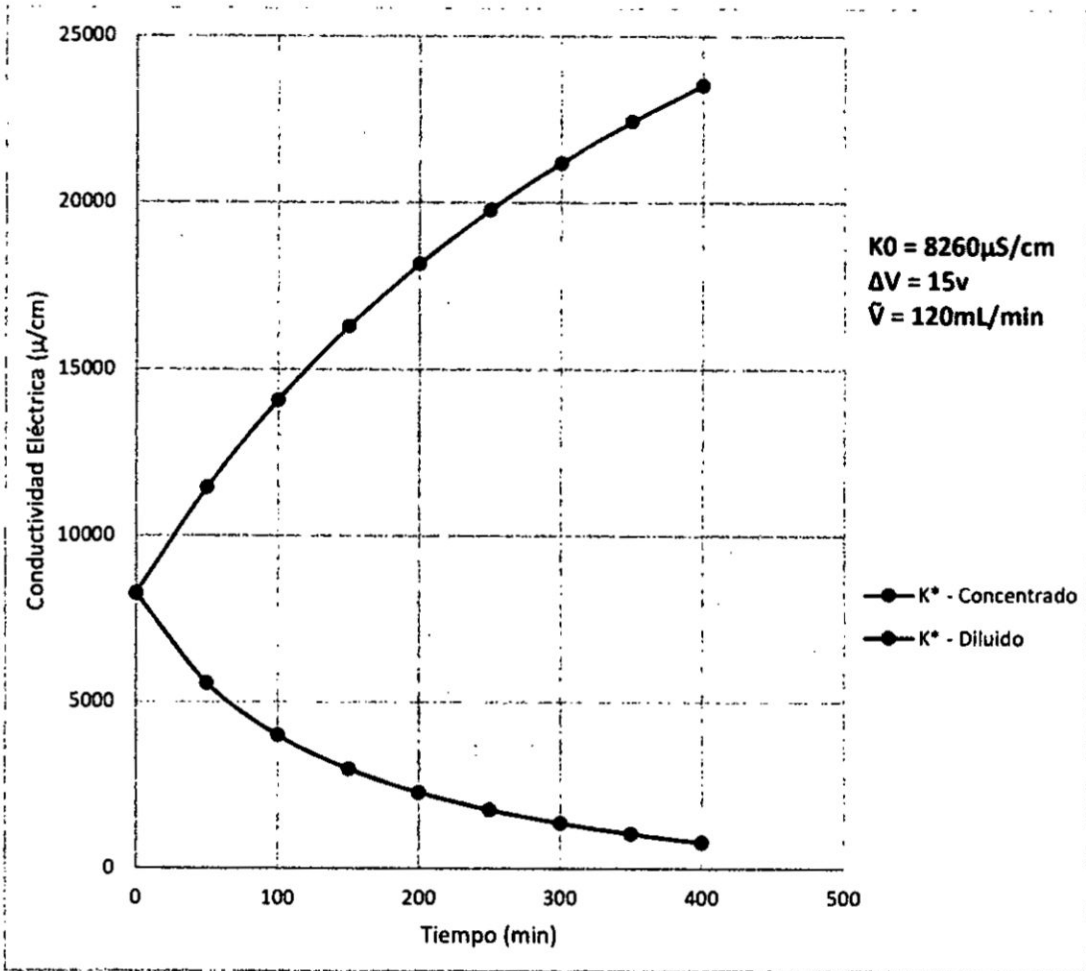
**Tabla 5.26**  
Coeficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	473,33	135
B	33333,33	-10000
R <sup>2</sup>	0,9926	0,9919

Fuente: Elaboración propia

La proyección gráfica:

**Gráfica 5.14**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

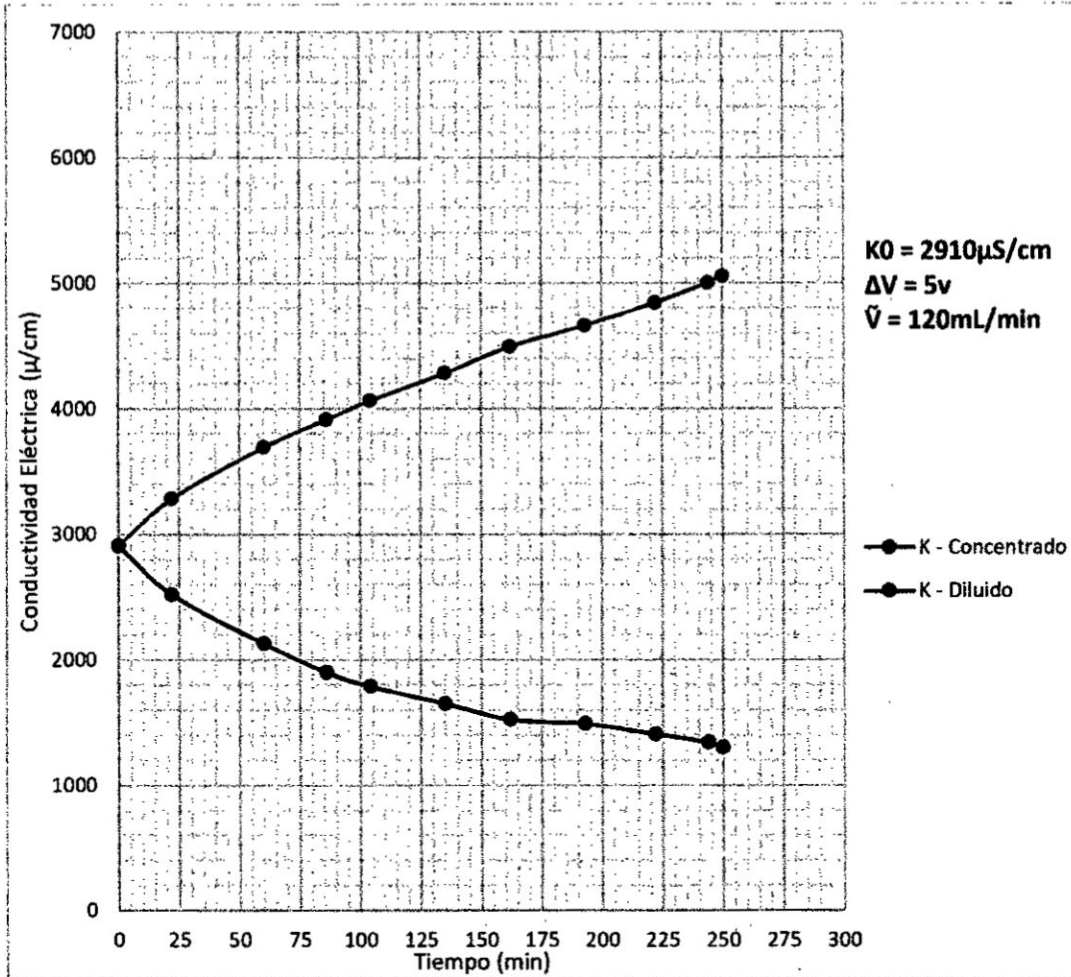
**Tabla 5.28**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 6		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH		K - Diluido	pH
0	0	2910	10,96	0,48	2910	10,96
1	22	3280	11,12	0,42	2520	10,75
2	60	3690	11,23	0,39	2130	10,34
3	86	3910	11,34	0,36	1900	10,16
4	104	4060	11,53	0,33	1790	9,82
5	135	4280	11,71	0,31	1652	9,52
6	162	4490	11,97	0,29	1523	9,37
7	193	4660	12,25	0,26	1491	9,08
8	222	4840	12,32	0,22	1407	8,75
9	244	5000	12,37	0,19	1342	8,54
10	250	5050	12,42	0,18	1301	8,26

Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado:

**Gráfica 5.16**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.29**  
Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	2910	2910
50	3639	2214
100	4106	1877
150	4431	1678
200	4671	1548
250	4854	1455
300	4999	1386
350	5117	1332
400	5214	1289

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(concentrado) = \frac{B \cdot t}{A + t} + K_0$$

$$K^*(diluido) = \frac{B \cdot t}{A + t} + K_0$$

**Tabla 5.30**  
Coeficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	178,67	93,6
B	3333,33	-2000
R <sup>2</sup>	0,9946	0,9988

Fuente: Elaboración propia



A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

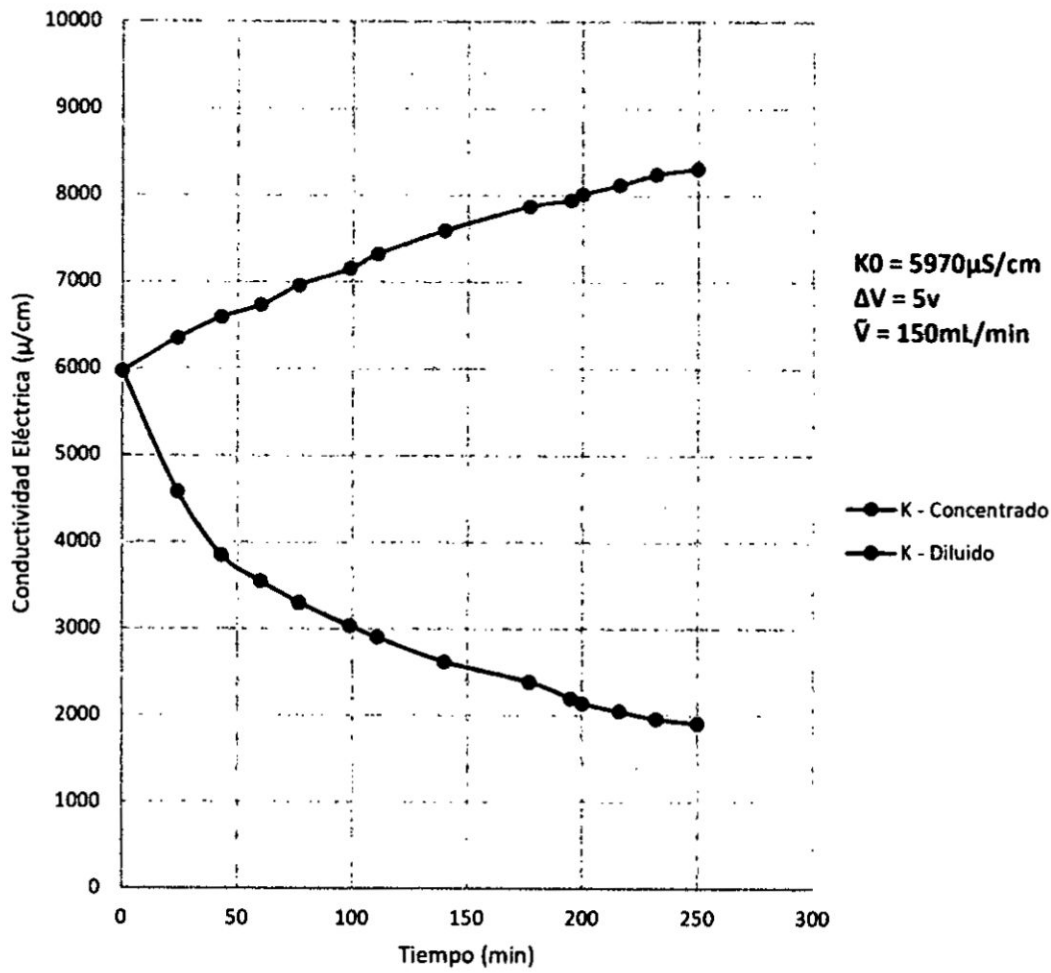
**Tabla 5.32**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 7		TANQUE 1		Intensidad	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH	Corriente (A)	K - Diluido	pH
0	0	5970	10,47	0,49	5970	10,47
1	24	6350	10,64	0,43	4580	10,31
2	43	6590	10,86	0,41	3850	10,27
3	60	6730	11,03	0,4	3550	10,17
4	77	6960	11,29	0,37	3300	10,01
5	99	7150	11,33	0,34	3030	9,87
6	111	7320	11,47	0,33	2900	9,73
7	140	7590	11,53	0,31	2620	9,63
8	177	7870	11,66	0,29	2390	9,41
9	195	7940	11,86	0,26	2200	9,28
10	200	8010	12,06	0,26	2140	9,11
11	216	8120	12,14	0,22	2050	9,02
12	232	8240	12,21	0,2	1960	8,95
13	250	8310	12,39	0,19	1909	8,88

Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado

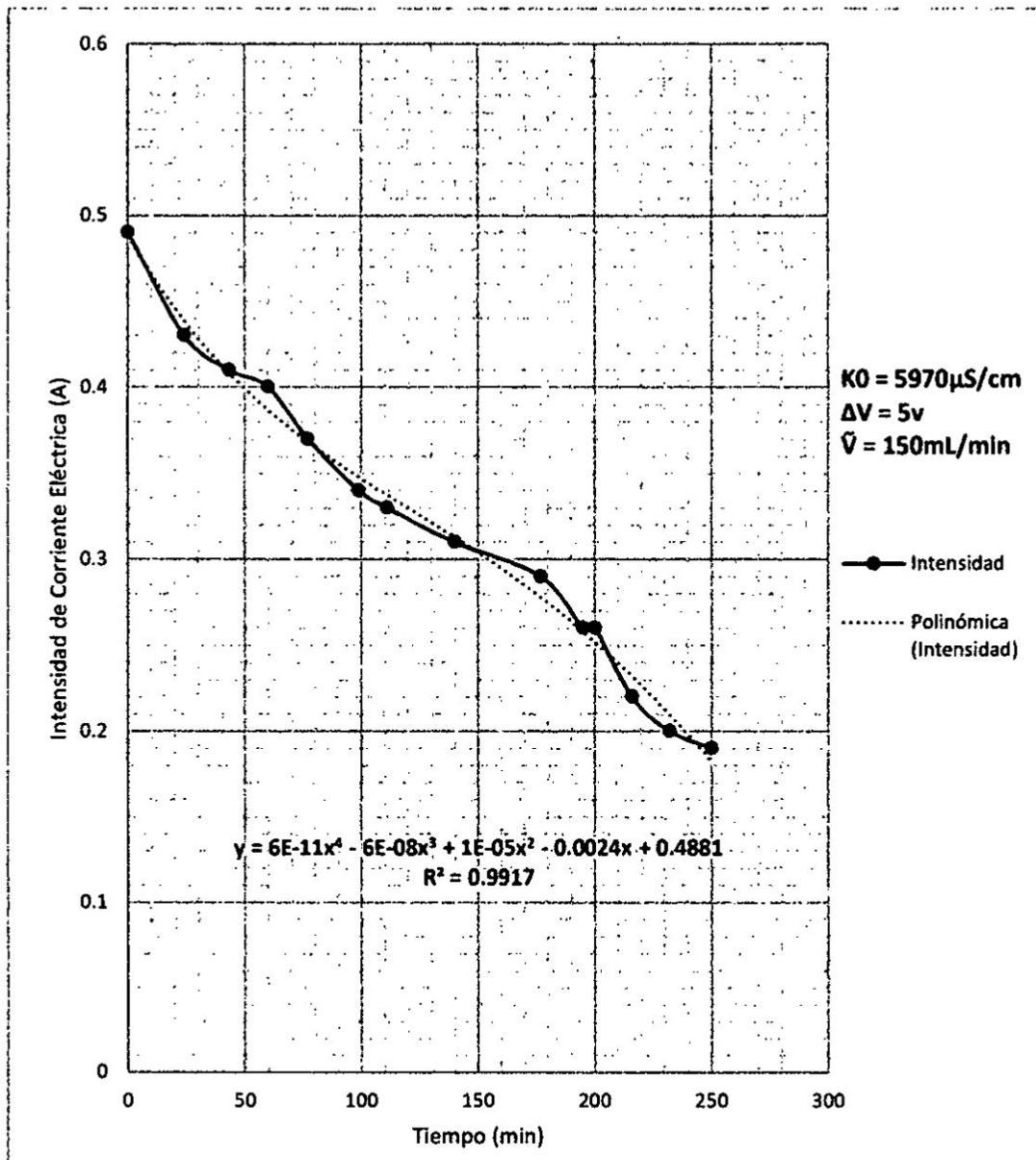
**Gráfica 5.19**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

La intensidad de corriente eléctrica respecto al tiempo se desarrolló:

**Gráfica 5.21**  
Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

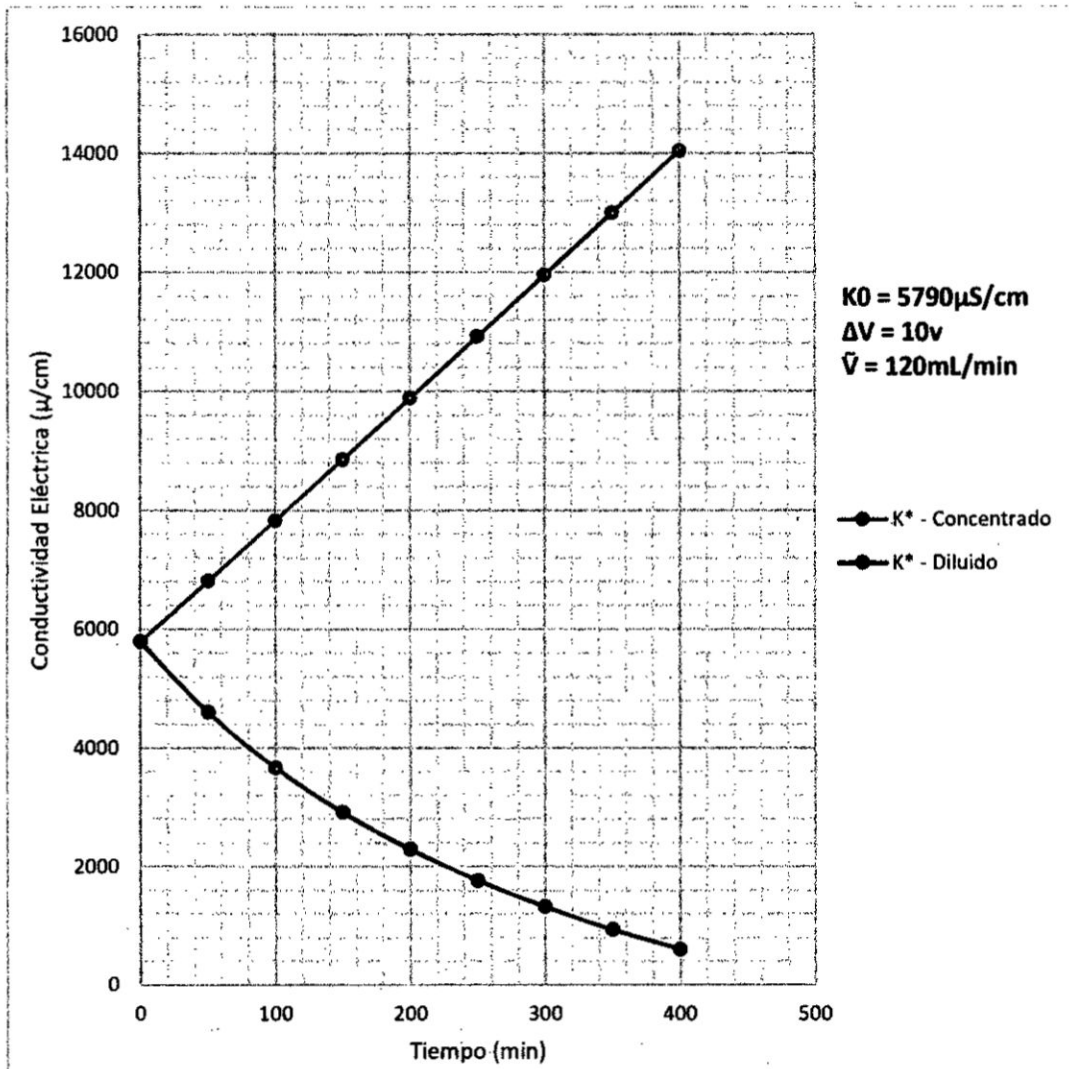
**Tabla 5.36**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 8		TANQUE 1		Intensidad	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH	Corriente (A)	K - Diluido	pH
0	0	5790	11,72	0,84	5790	11,72
1	22	6233	11,95	0,83	5230	11,53
2	66	7142	12,02	0,75	4490	11,46
3	92	7890	12,13	0,63	4020	11,31
4	110	8310	12,29	0,52	3672	11,21
5	164	9550	12,37	0,36	3010	11,09
6	181	9840	12,58	0,34	2780	10,98
7	202	9870	12,64	0,33	2490	10,77
8	226	10310	12,79	0,31	2320	10,61
9	242	10720	12,81	0,27	2210	10,41
10	250	10740	12,96	0,26	2141	10,23

Fuente: Elaboración propia

La proyección gráfica:

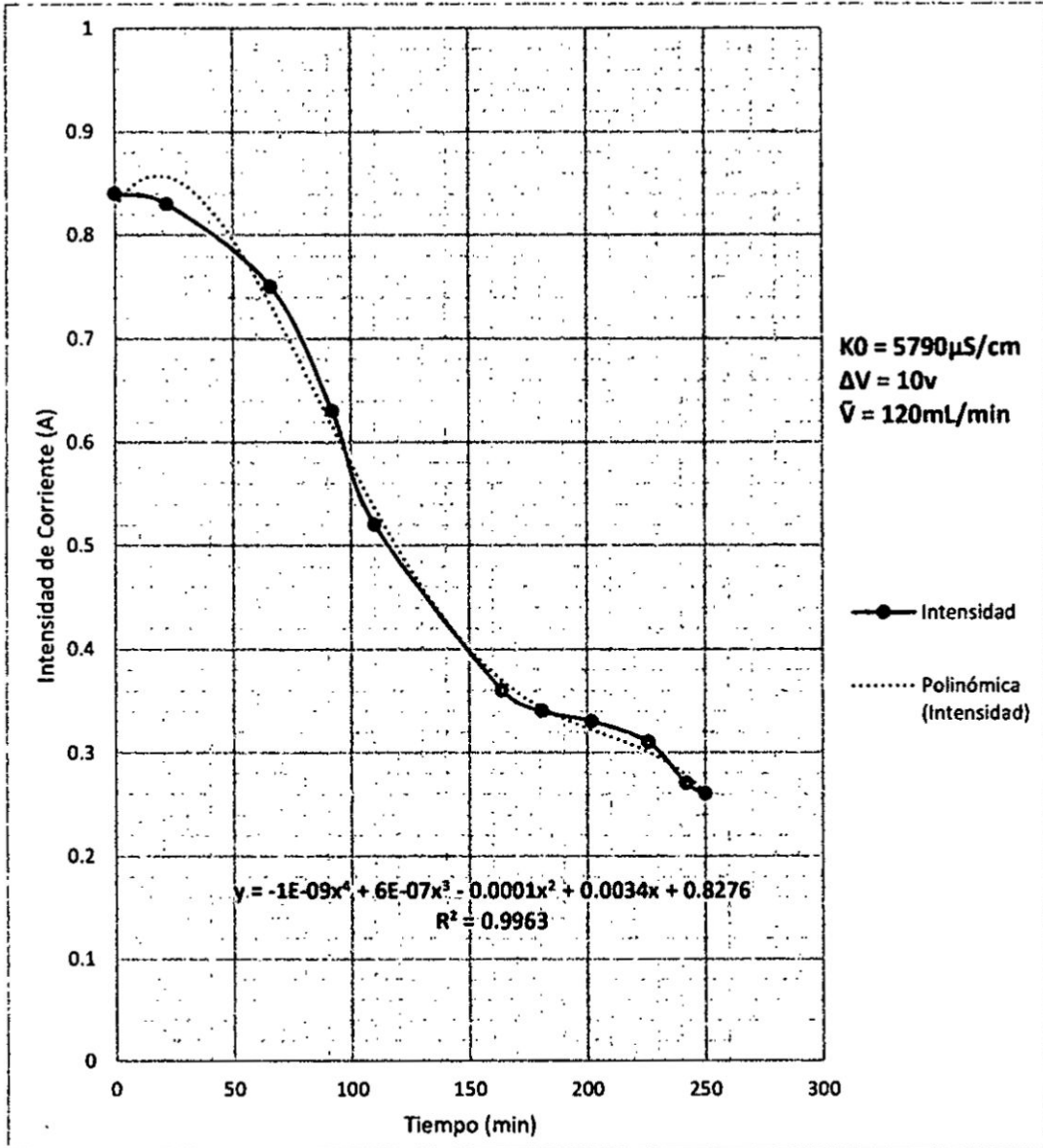
**Gráfica 5.23**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

La intensidad de corriente eléctrica respecto al tiempo se desarrolló:

**Gráfica 5.24**  
Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.1.9 Muestra N°9

Prueba experimental N°8 según el diseño de experimento. (Véase, Tabla 4.7)

**Tabla 5.39**  
Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis

<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>) - <math>K_0</math></b>	<b>3160</b>
pH 0	10,12
<b>Voltaje - <math>\Delta V</math></b>	<b>15</b>
<b>Caudal Operación (<math>\text{mL}/\text{min}</math>) - <math>\dot{V}</math></b>	<b>150</b>
Intensidad de corriente (A)	1,46
<b>% Separación de Sales (%SS)</b>	<b>60,09%</b>
Concentración Inicial (mg/L)	1580
Concentración Final Diluido (mg/L)	630,5
Concentración Final Concentrado (mg/L)	2055
Integral de la carga eléctrica	11959,75

Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

**Tabla 5.40**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

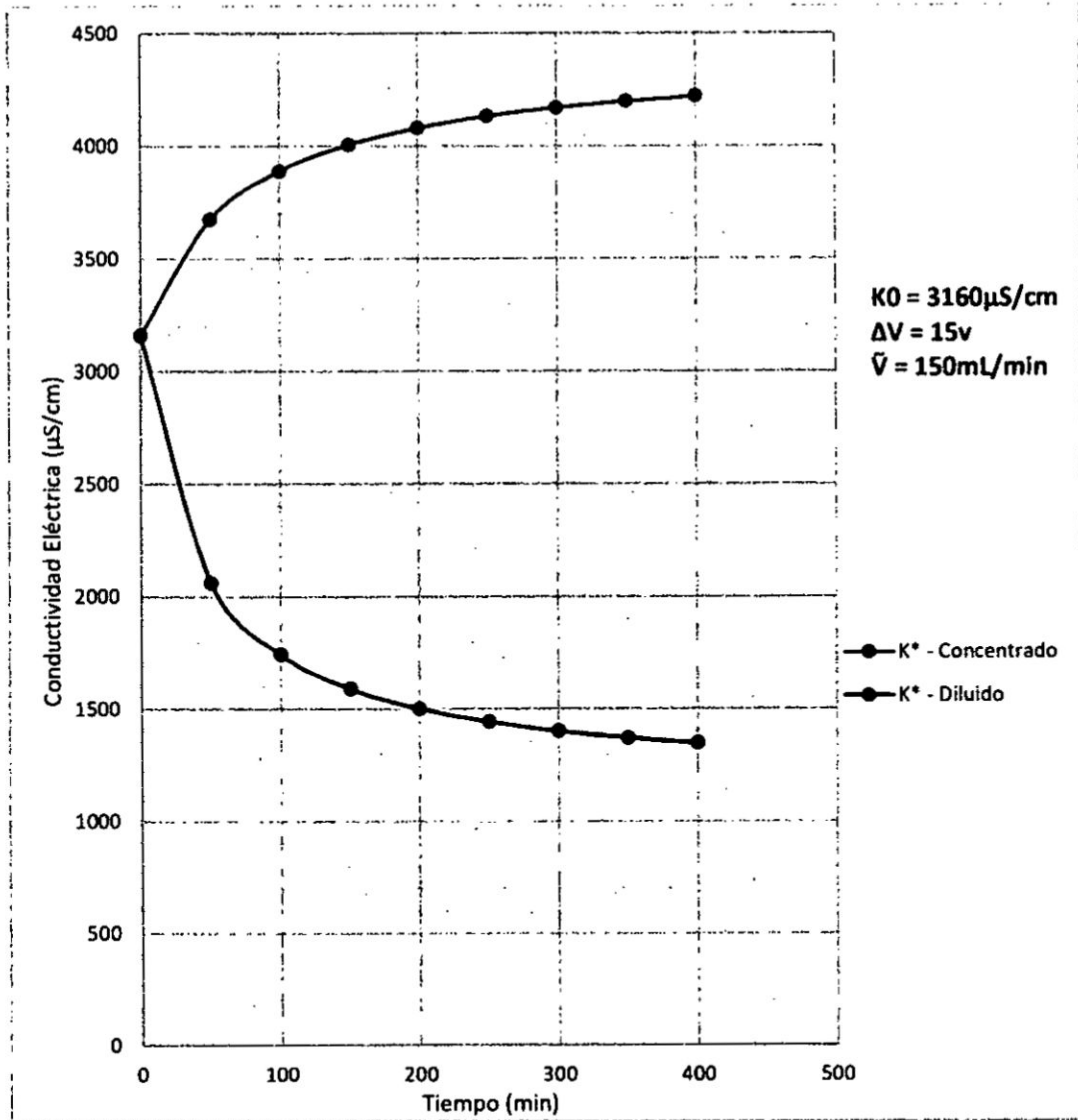
MUESTRA 9		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH		K - Diluido	pH
0	0	3160	10,12	1,46	3160	10,12
1	15	3380	10,38	1,33	2610	9,96
2	40	3570	10,59	1,19	2220	9,81
3	55	3640	10,83	1,11	2040	9,79
4	90	3770	11,19	0,96	1810	9,67
5	100	3810	11,34	0,92	1751	9,48
6	134	3880	11,48	0,79	1592	9,32
7	177	3970	11,55	0,66	1446	9,08
8	207	4020	11,73	0,64	1369	8,84
9	230	4050	11,98	0,61	1307	8,75
10	250	4110	12,11	0,58	1261	8,23

Fuente: Elaboración propia



La proyección gráfica:

**Gráfica 5.26**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

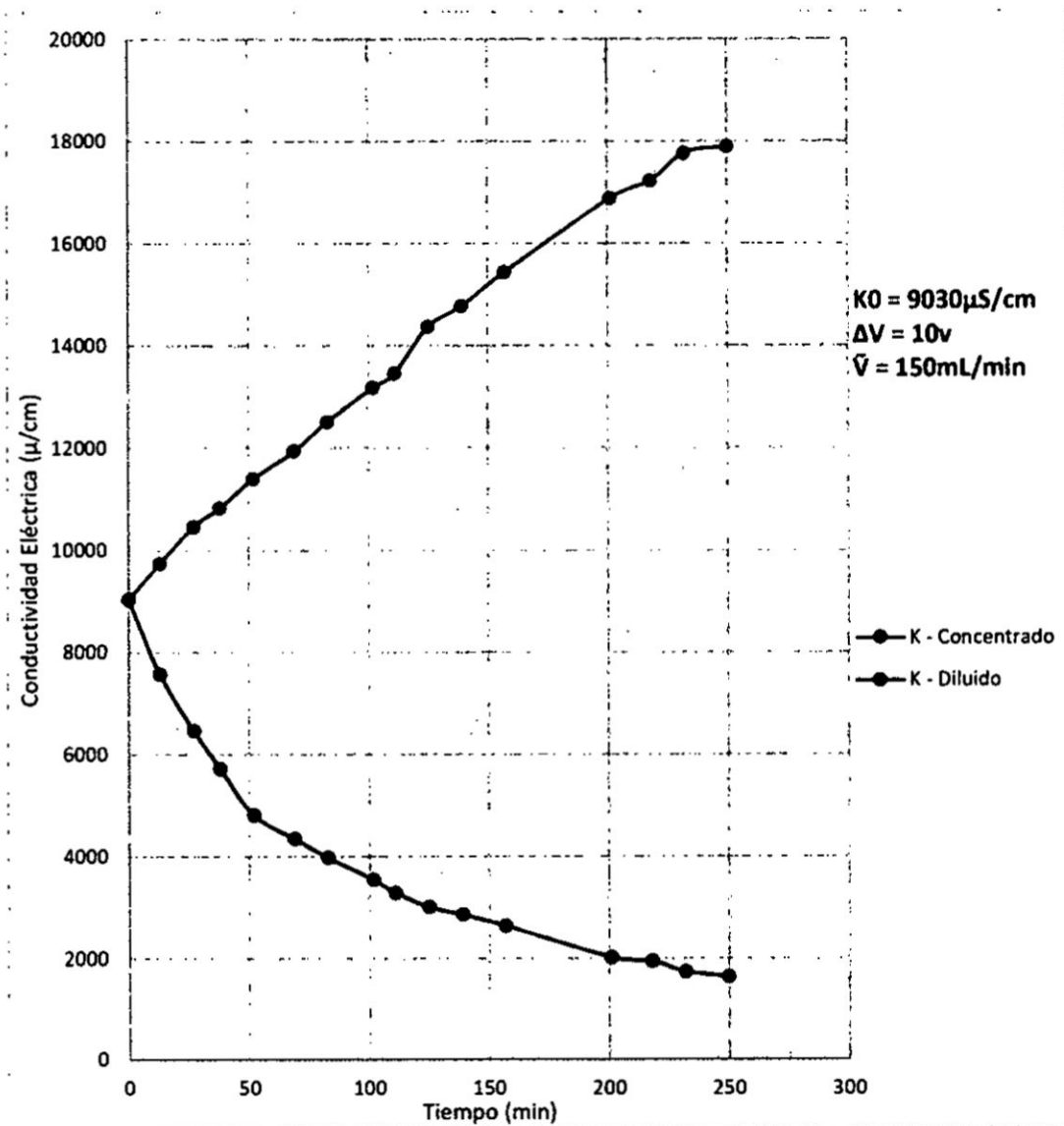
**Tabla 5.44**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 1		TANQUE 1		Intensidad	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH	Corriente (A)	K - Diluido	pH
0	0	9030	12,05	1,13	9030	12,05
1	13	9730	12,26	1,04	7570	11,95
2	27	10450	12,43	0,96	6460	11,87
3	38	10820	12,56	0,89	5720	10,69
4	52	11390	12,71	0,84	4810	10,46
5	69	11930	12,86	0,8	4350	10,21
6	83	12510	12,93	0,74	3980	10,01
7	102	13170	13,06	0,7	3540	9,96
8	111	13450	13,18	0,67	3290	9,71
9	125	14360	13,24	0,57	3010	9,63
10	139	14770	13,31	0,54	2860	9,47
11	157	15430	13,41	0,48	2640	9,33
12	201	16870	13,49	0,41	2020	9,24
13	218	17220	13,53	0,37	1951	9,18
14	232	17760	13,61	0,33	1741	9,06
15	250	17890	13,72	0,32	1642	8,82

Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado

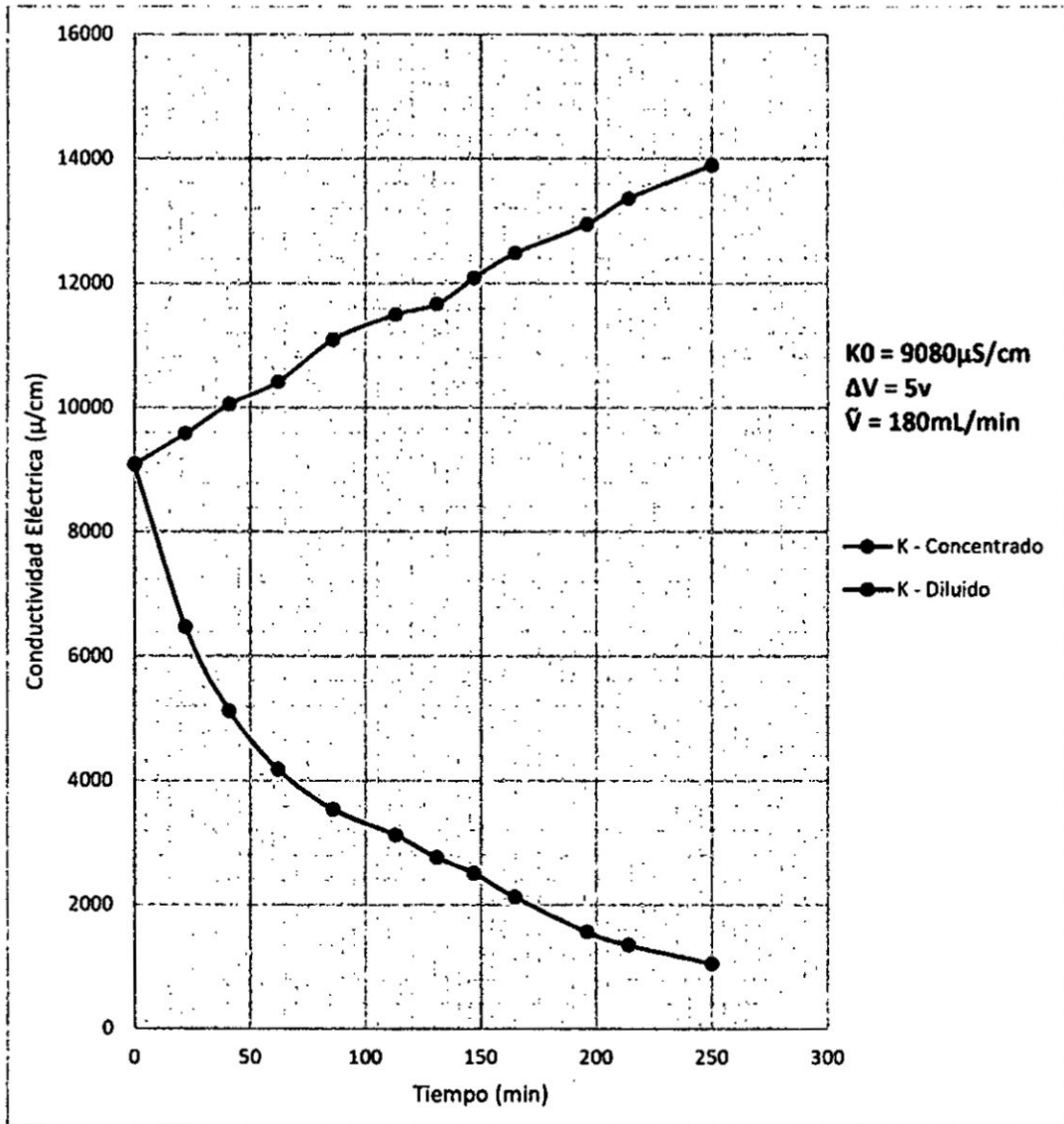
**Gráfica 5.28**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado

**Gráfica 5.31**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.49 :**  
Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* Concentrado (μS/cm)	K* Diluido (μS/cm)
0	9080	9080
50	10196	4575
100	11217	2869
150	12154	1971
200	13017	1417
250	13815	1041
300	14554	770
350	15242	564
400	15883	403

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(\text{concentrado}) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

$$K^*(\text{diluido}) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

**Tabla 5.50**  
Coeficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	1070	61
B	25000	-10000
R <sup>2</sup>	0,9981	0,9964

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.3 Muestra N°3

Prueba experimental N°6 según el diseño de experimento. (Véase, Tabla 4.8)

**Tabla 5.51**

Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis.

Conductividad Eléctrica Inicial ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) - K0	2920
pH 0	11,34
Voltaje - $\Delta V$	10
Caudal Operación (mL/min) - $\dot{V}$	180
Intensidad de corriente (A)	1,21
% Separación (%S)	66,51%
Concentración Inicial (mg/L)	1460
Concentración Final Diluido (mg/L)	489
Concentración Final Concentrado (mg/L)	2590
Integral de la carga eléctrica ( $\text{A}\cdot\text{s}$ )	5821,13

Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

**Tabla 5.52**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 3		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K- Concentrado	pH		K- Diluido	pH
0	0	2920	11,34	1,21	2920	11,34
1	22	3280	11,58	1,11	2530	10,98
2	38	3540	11,86	1,03	2320	10,44
3	53	3650	12,03	0,96	2140	10,16
4	73	3770	12,14	0,85	1982	9,81
5	84	3850	12,68	0,69	1862	9,53
6	93	3890	12,94	0,63	1744	9,22
7	137	4160	13,16	0,51	1508	9,08
8	155	4300	13,19	0,48	1396	8,85
9	177	4430	13,28	0,42	1292	8,63
10	200	4670	13,37	0,35	1189	8,56
11	219	4810	13,42	0,32	1117	8,42
12	232	5030	13,51	0,28	1037	8,39
13	250	5180	13,59	0,25	978	8,13

Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.53**

Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	2920	2920
50	3650	2146
100	4118	1664
150	4443	1334
200	4682	1095
250	4866	914
300	5011	771
350	5128	656
400	5225	561

Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(concentrado) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

$$K^*(diluido) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

**Tabla 5.54**

Coefficientes para la regresión hiperbólica

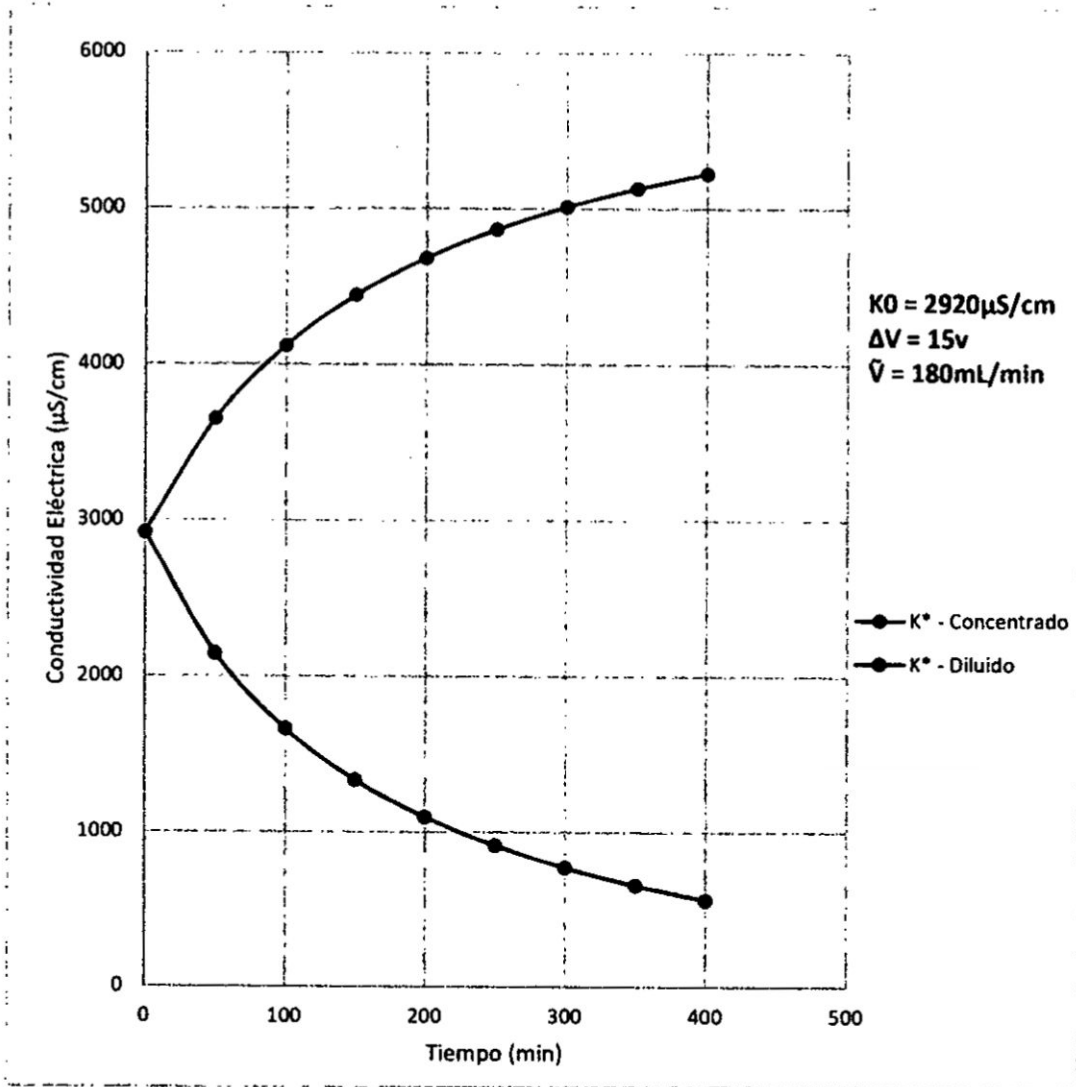
Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	178,33	165,33
B	3333,33	-3333,33
R <sup>2</sup>	0,9895	0,9986

Elaboración propia



La proyección gráfica:

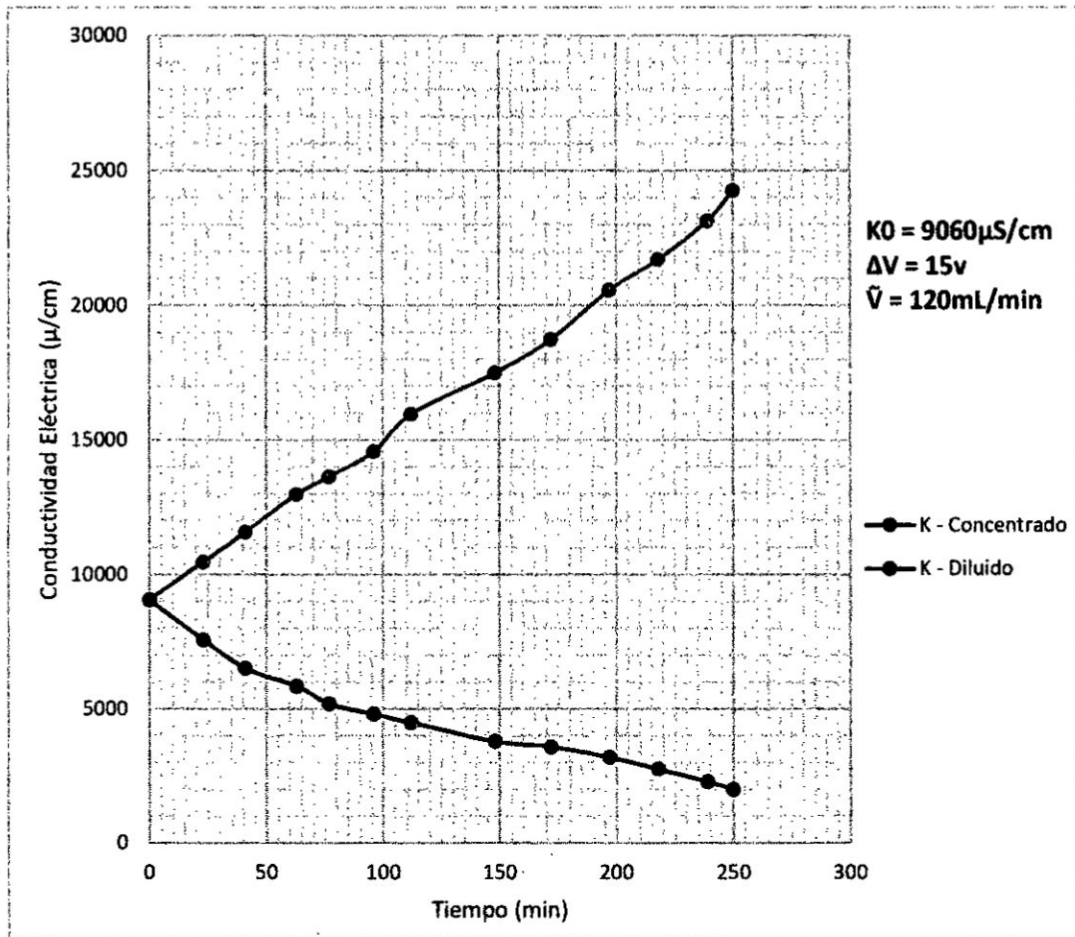
**Gráfica 5.35**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado

**Gráfica 5.37**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.57**

Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	9060	9060
50	12081	6282
100	15012	4712
150	17858	3703
200	20621	2999
250	23305	2481
300	25914	2083
350	28451	1768
400	30918	1513

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(concentrado) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

$$K^*(diluido) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

**Tabla 5.58**

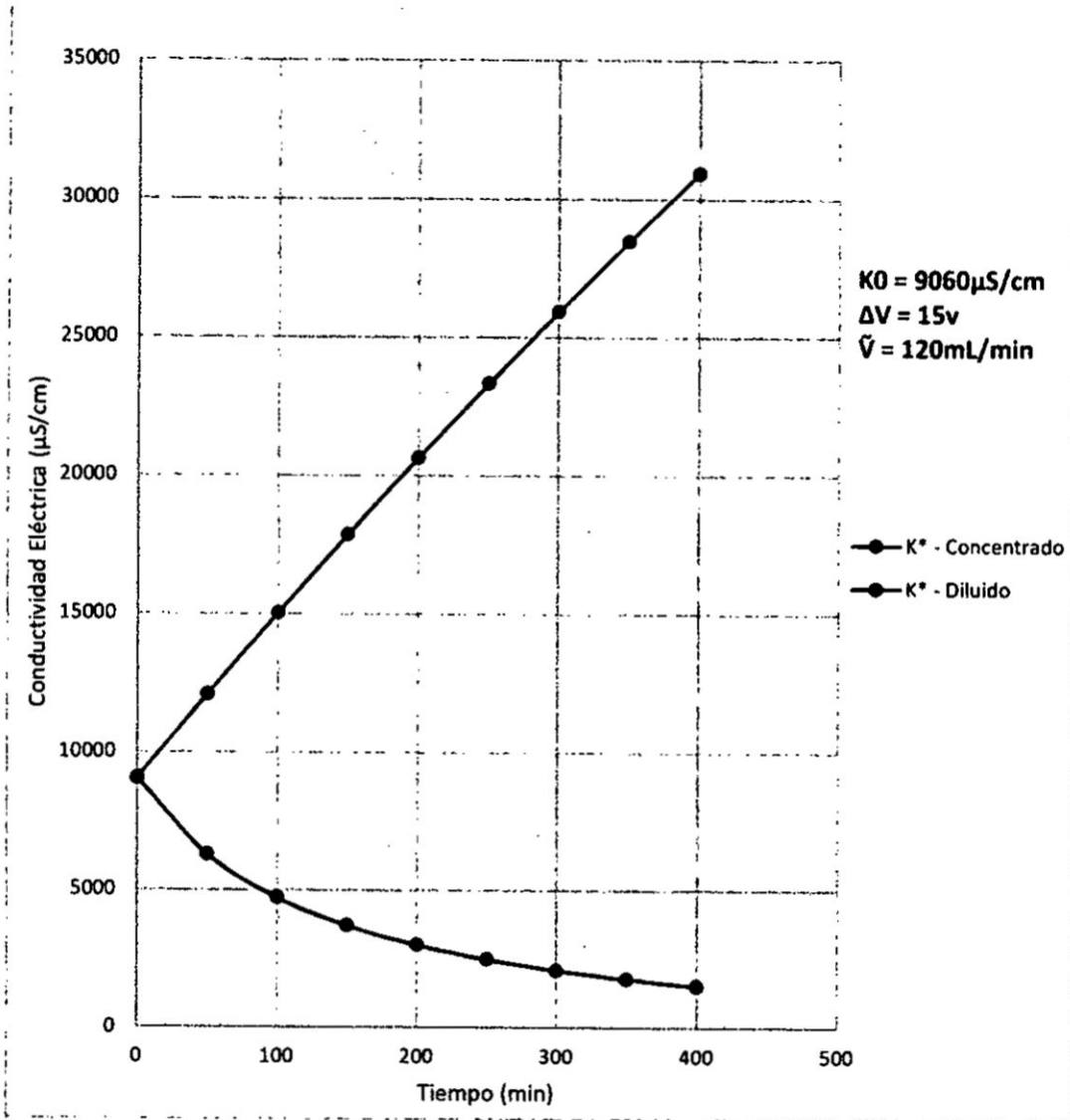
Coefficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	3260	130
B	200000	-10000
R <sup>2</sup>	0,9955	0,9961

Fuente: Elaboración propia

La proyección gráfica:

**Gráfica 5.38**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

**Tabla 5.60**

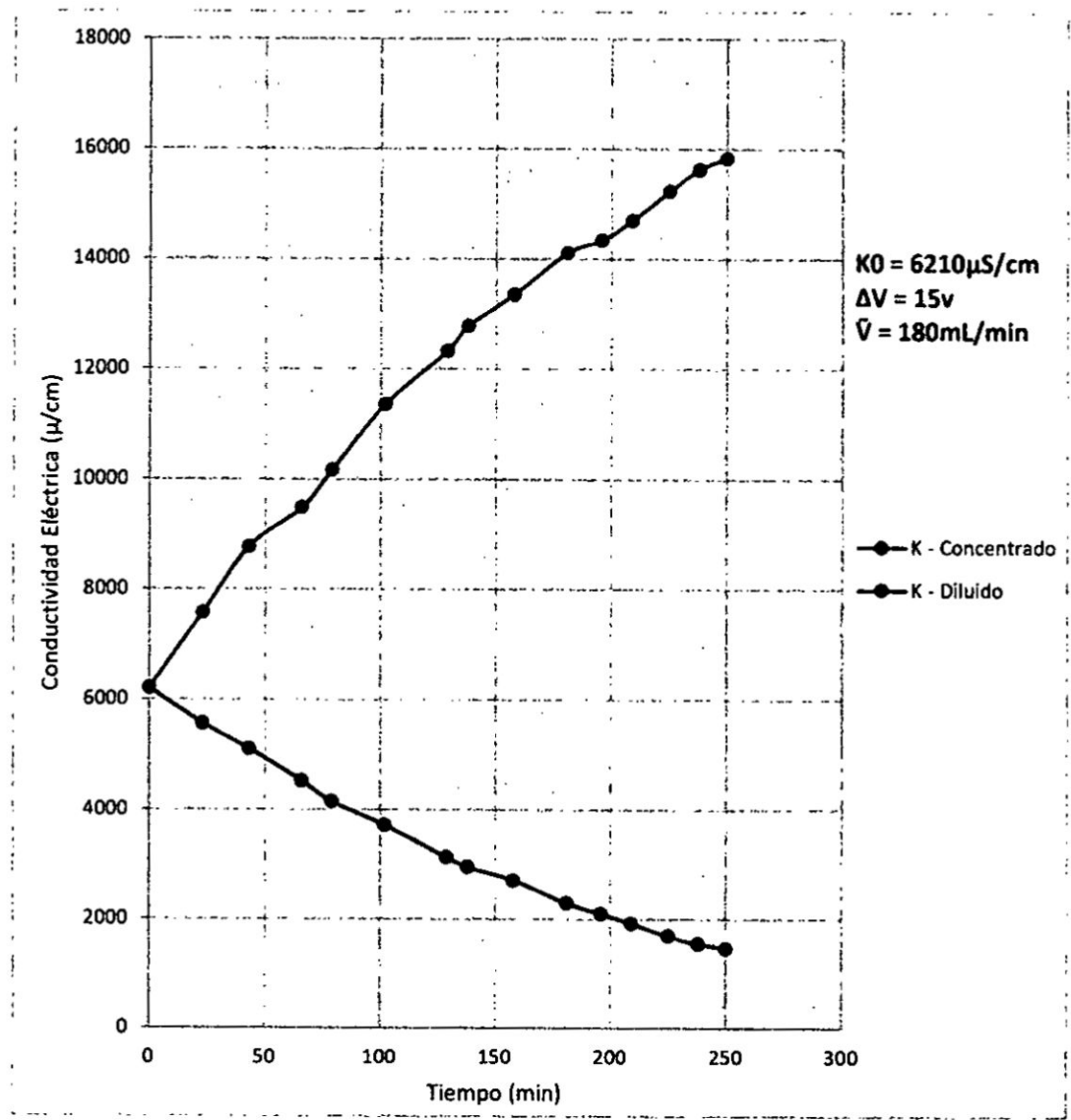
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 5		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH		K - Diluido	pH
0	0	6210	11,24	1,07	6210	11,24
1	23	7570	11,47	1,02	5570	11,06
2	43	8770	11,91	0,98	5110	10,98
3	66	9480	12,08	0,94	4520	10,92
4	79	10160	12,17	0,86	4150	10,87
5	102	11350	12,27	0,81	3720	10,75
6	129	12330	12,39	0,74	3130	10,68
7	138	12780	12,42	0,69	2950	10,56
8	158	13350	12,54	0,56	2710	10,45
9	181	14110	12,64	0,43	2290	10,38
10	196	14340	12,78	0,38	2100	10,28
11	209	14700	12,81	0,33	1922	10,19
12	225	15230	12,95	0,27	1691	10,02
13	238	15630	13,06	0,25	1546	9,92
14	250	15830	13,12	0,24	1466	9,83

Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado

**Gráfica 5.40**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.6 Muestra N°6

Prueba experimental N°2 según el diseño de experimento. (Véase, Tabla 4.8)

**Tabla 5.63**  
Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis

<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>) - K0</b>	<b>6120</b>
pH 0	10,83
<b>Voltaje - <math>\Delta V</math></b>	<b>5</b>
<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\dot{V}</math></b>	<b>150</b>
Intensidad de corriente (A)	0,46
<b>% Separación de Sales (%SS)</b>	<b>67,91%</b>
Concentración Inicial (mg/L)	3060
Concentración Final Diluido (mg/L)	982
Concentración Final Concentrado (mg/L)	4740
Integral de la carga eléctrica (A*s)	3750,88

Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

**Tabla 5.64**

Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 6		TANQUE 1		Intensidad	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH	Corriente (A)	K - Diluido	pH
0	0	6120	10.83	0,46	6120	10.83
1	16	6400	11.23	0,43	5240	9.24
2	33	6710	11.46	0,39	4470	8.96
3	52	7060	11.53	0,37	3910	8.83
4	68	7250	11.79	0,34	3500	8.79
5	83	7520	11.83	0,31	3280	8.63
6	104	7800	11.97	0,29	2900	8.57
7	123	8180	12.04	0,28	2680	8.43
8	144	8490	12.15	0,26	2460	8.26
9	151	8580	12.27	0,25	2350	8.16
10	173	8970	12.29	0,24	2230	8.09
11	191	9140	12.32	0,23	2140	8.02
12	217	9330	12.38	0,2	2020	7.98
13	250	9480	12.49	0,18	1964	7.96

Fuente: Elaboración propia



Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.65**

Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	6120	6120
50	6984	4144
100	7789	3287
150	8543	2809
200	9250	2503
250	9914	2292
300	10538	2136
350	11127	2017
400	11683	1923

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(\text{concentrado}) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

$$K^*(\text{diluido}) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

**Tabla 5.66**

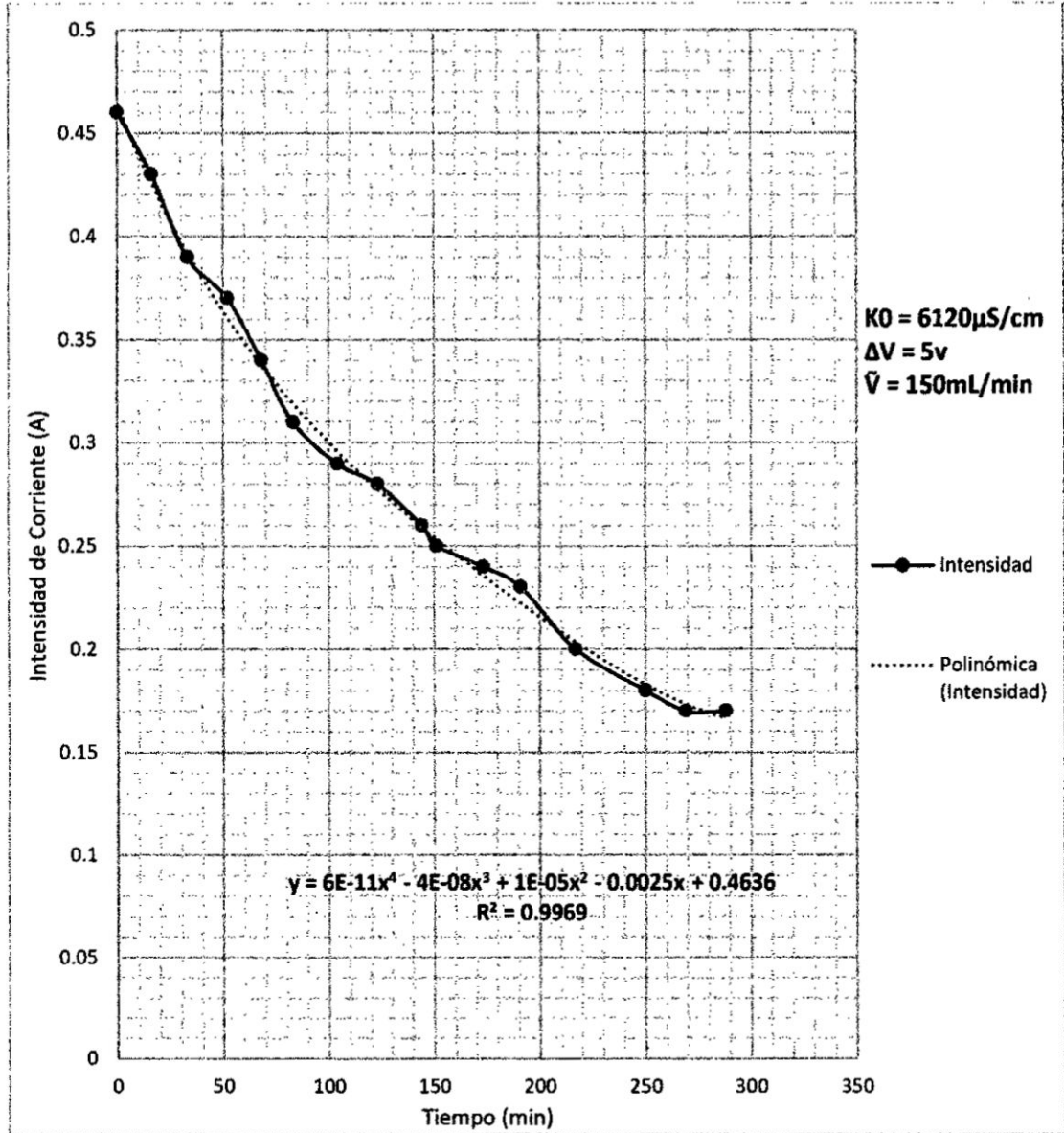
Coefficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	1397,5	76,5
B	25000	-5000
R <sup>2</sup>	0,9992	0,9984

Fuente: Elaboración propia

La intensidad de corriente eléctrica respecto al tiempo se desarrolló:

**Gráfica 5.45**  
Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.7 Muestra N°7

Prueba experimental N°1 según el diseño de experimento. (Véase, Tabla 4.8)

**Tabla 5.67**  
Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis

Conductividad Eléctrica Inicial ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) - K0	3270
pH 0	10,43
Voltaje - $\Delta V$	5
Caudal Operación (mL/min) - V	120
Intensidad de corriente (A)	0,47
% Separación de Sales (%SS)	54,04%
Concentración Inicial (mg/L)	1635
Concentración Final Diluido (mg/L)	765
Concentración Final Concentrado (mg/L)	2535
Integral de la carga eléctrica (A*s)	5335,81

Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

**Tabla 5.68**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 7		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH		K - Diluido	pH
0	0	3270	10,43	0,47	3270	10,43
1	9	3370	10,52	0,45	3080	10,07
2	23	3520	10,66	0,42	2820	9,98
3	38	3660	10,69	0,41	2610	9,71
4	68	4050	10,72	0,37	2330	9,58
5	98	4180	10,83	0,34	2170	9,17
6	131	4350	11,03	0,32	2070	8,83
7	151	4500	11,14	0,3	1956	8,61
8	172	4560	11,26	0,28	1777	8,05
9	195	4710	11,36	0,26	1725	7,86
10	218	4890	11,44	0,23	1680	7,71
11	235	4960	11,51	0,2	1606	7,32
12	250	5070	11,62	0,17	1530	7,26

Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.69**

Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	3270	3270
50	3780	2479
100	4196	2068
150	4541	1817
200	4833	1647
250	5082	1524
300	5297	1432
350	5485	1360
400	5651	1301

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(concentrado) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

$$K^*(diluido) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

**Tabla 5.70**

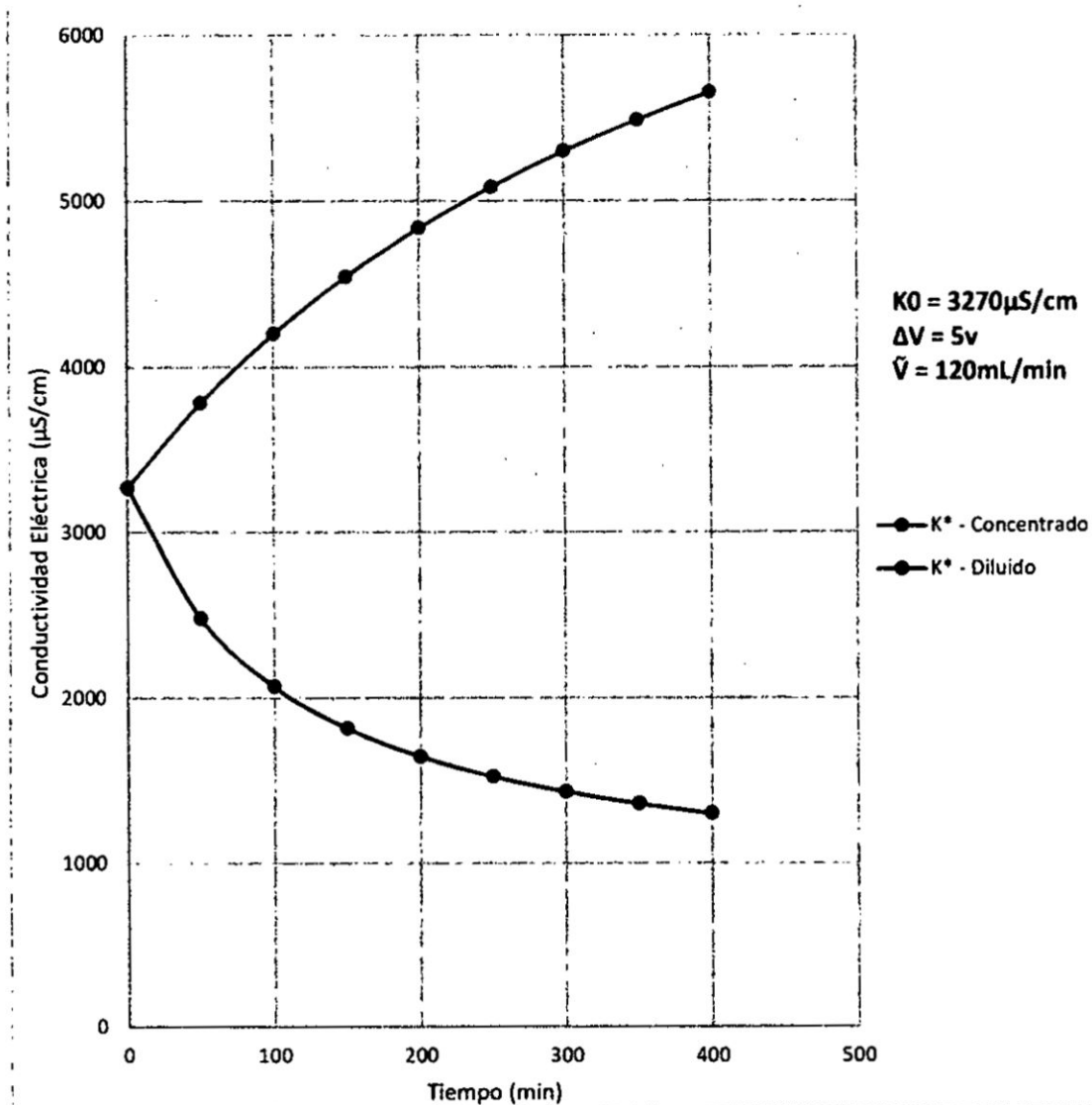
Coefficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	440	108
B	5000	-2500
R <sup>2</sup>	0,9939	0,9988

Fuente: Elaboración propia

La proyección gráfica:

**Gráfica 5.47**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.8 Muestra N°8

Prueba experimental N°4 según el diseño de experimento. (Véase, Tabla 4.8)

**Tabla 5.71**  
Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis

<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>) - K0</b>	<b>6070</b>
pH 0	10,83
<b>Voltaje - <math>\Delta V</math></b>	<b>10</b>
<b>Caudal Operación (mL/min) - V</b>	<b>120</b>
Intensidad de corriente (A)	0,89
<b>% Separación de Sales (%SS)</b>	<b>62.44%</b>
Concentración Inicial (mg/L)	3035
Concentración Final Diluido (mg/L)	1140
Concentración Final Concentrado (mg/L)	5330
Integral de la carga eléctrica (A*s)	5168,5

Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

**Tabla 5.72**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

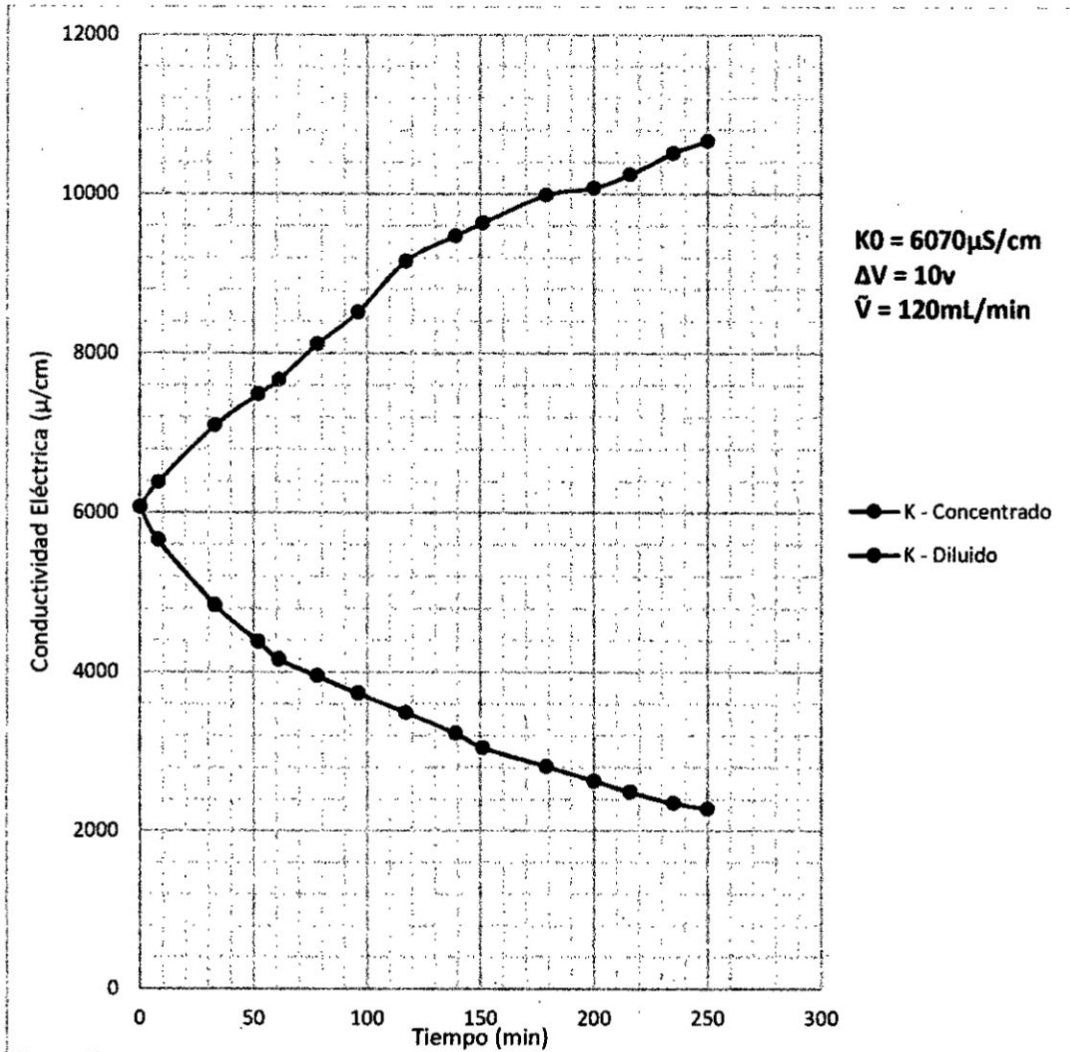
MUESTRA 8		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH		K - Diluido	pH
0	0	6070	10,83	0,89	6070	10,83
1	8	6380	10,89	0,88	5650	10,76
2	33	7090	10,94	0,83	4840	10,64
3	52	7480	11,04	0,76	4380	10,56
4	61	7660	11,16	0,73	4160	10,51
5	78	8110	11,26	0,62	3950	10,42
6	96	8510	11,36	0,55	3730	10,38
7	117	9150	11,47	0,49	3490	10,27
8	139	9470	11,52	0,43	3230	10,23
9	151	9630	11,6	0,39	3050	10,15
10	179	9980	11,74	0,37	2810	10,09
11	200	10070	11,78	0,34	2630	9,91
12	216	10240	11,84	0,29	2490	9,88
13	235	10510	11,99	0,27	2350	9,73
14	250	10660	12,13	0,25	2280	9,68

Fuente: Elaboración propia



Siendo graficado

**Gráfica 5.49**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.73**

Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado ( $\mu\text{S/cm}$ )	K* - Diluido ( $\mu\text{S/cm}$ )
0	6070	6070
50	7742	4245
100	8935	3396
150	9829	2905
200	10524	2586
250	11080	2361
300	11534	2194
350	11913	2065
400	12233	1963

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(\text{concentrado}) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

$$K^*(\text{diluido}) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

**Tabla 5.74**

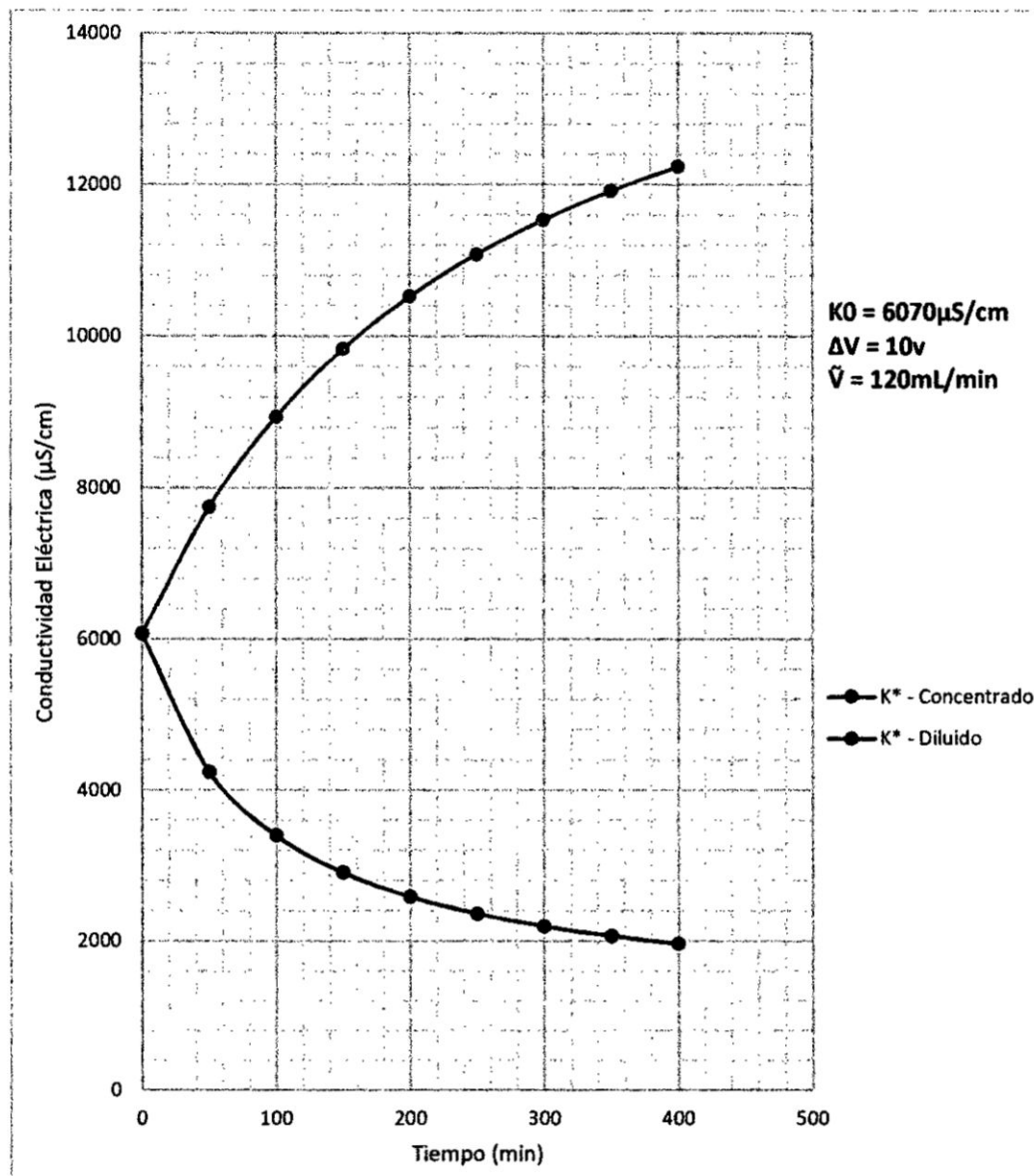
Coefficientes para la regresión hiperbólica

Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	249	87
B	10000	-5000
R <sup>2</sup>	0,9966	0,9975

Fuente: Elaboración propia

La proyección gráfica:

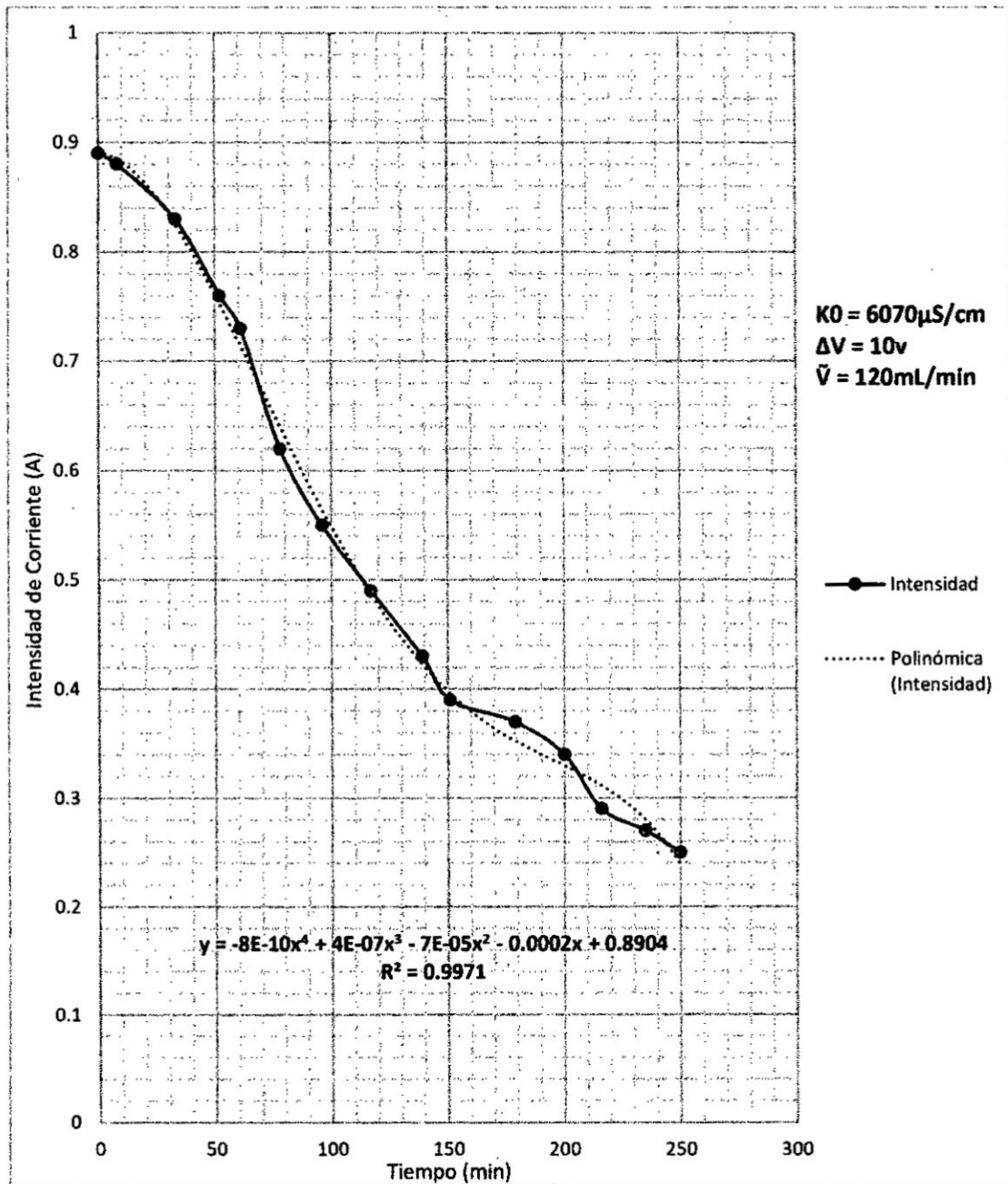
**Figura 5.50**  
Proyección a través del tiempo usando ajuste hiperbólico



Fuente: Elaboración propia

La intensidad de corriente eléctrica respecto al tiempo se desarrolló:

**Gráfica 5.51:**  
Variación de la Intensidad de Corriente Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.9 Muestra N°9

Prueba experimental N°8 según el diseño de experimento. (Véase, Tabla 4.8)

**Tabla 5.75**  
Parámetros de operación y porcentaje de separación logrado mediante la electrodiálisis

<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>) - K0</b>	<b>3130</b>
pH 0	10,05
<b>Voltaje - <math>\Delta V</math></b>	<b>15</b>
<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>150</b>
Intensidad de corriente (A)	1,47
<b>% Separación de Sales (%S)</b>	<b>60,83%</b>
Concentración Inicial (mg/L)	1565
Concentración Final Diluido (mg/L)	613
Concentración Final Concentrado (mg/L)	2060
Integral de la carga eléctrica	13534,63

Fuente: Elaboración propia

A través del tiempo, la conductividad eléctrica tuvo el siguiente desenvolvimiento respecto al tiempo durante 250min:

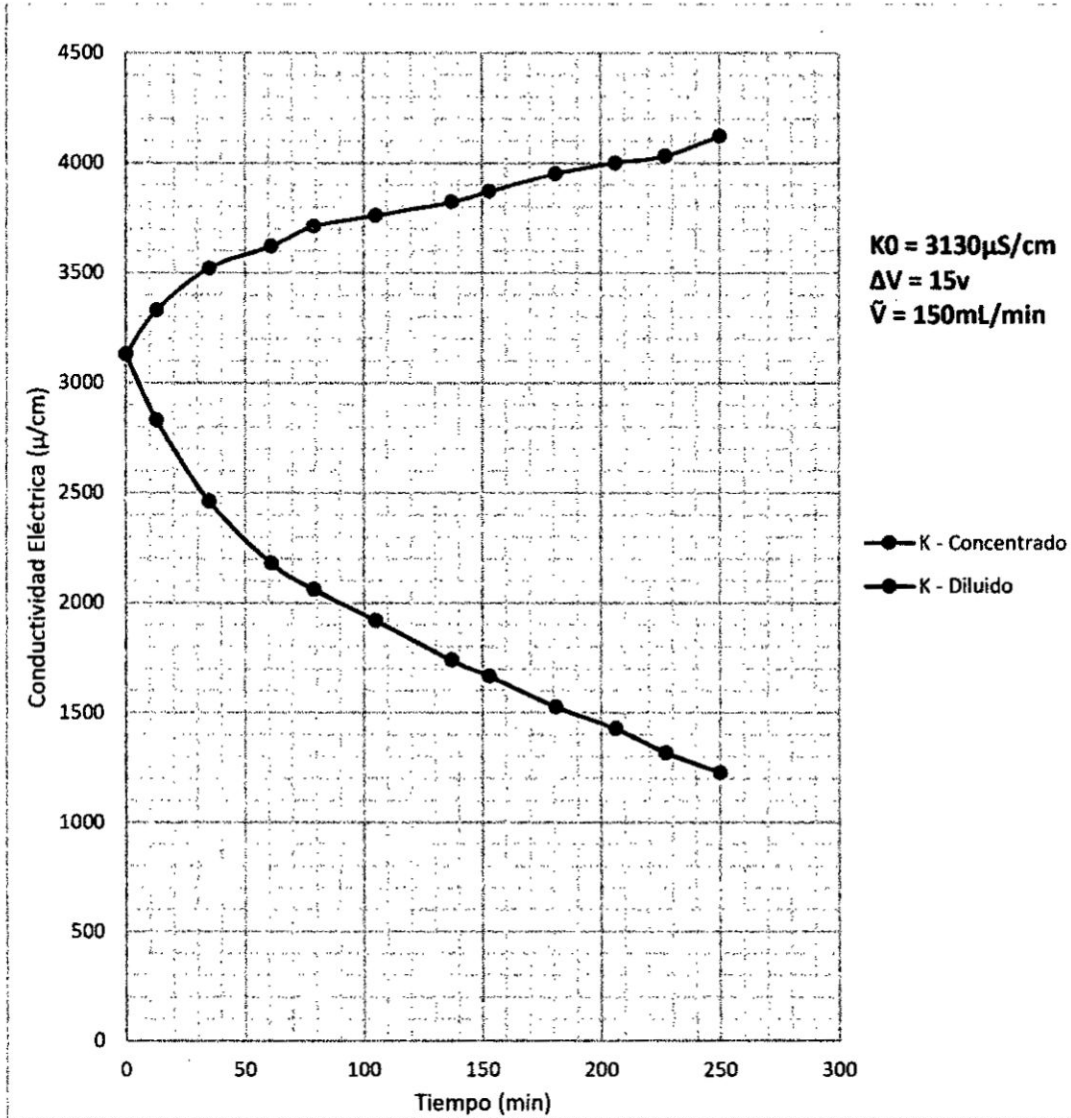
**Tabla 5.76**  
Variación de la conductividad eléctrica a través del tiempo mediante la electrodiálisis

MUESTRA 9		TANQUE 1		Intensidad Corriente (A)	TANQUE 2	
Medición	Tiempo (min)	K - Concentrado	pH		K - Diluido	pH
0	0	3130	10,05	1,47	3130	10,05
1	13	3330	10,12	1,43	2830	9,82
2	35	3520	10,27	1,38	2460	9,47
3	61	3620	10,37	1,31	2180	9,27
4	79	3710	10,41	1,27	2060	9,11
5	105	3760	10,57	1,22	1920	8,97
6	137	3820	10,67	1,17	1738	8,87
7	153	3870	10,73	1,11	1666	8,63
8	181	3950	10,85	0,98	1526	8,55
9	206	4000	10,94	0,79	1427	8,44
10	227	4030	11,01	0,66	1318	8,31
11	250	4120	11,13	0,57	1226	8,23

Fuente: Elaboración propia

Siendo graficado

**Gráfica 5.52**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Mediante un ajuste hiperbólico se proyectó:

**Tabla 5.77**

Proyección a través del tiempo de la conductividad eléctrica a través del tiempo

Tiempo (min)	K* - Concentrado (μS/cm)	K* - Diluido (μS/cm)
0	3130	3130
50	3615	2266
100	3783	1846
150	3869	1598
200	3920	1434
250	3955	1317
300	3980	1230
350	3998	1163
400	4013	1109

Fuente: Elaboración propia

Mediante las ecuaciones:

$$K^*(concentrado) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

$$K^*(diluido) = \frac{B \cdot t}{A+t} + K_0$$

**Tabla 5.78**

Coefficientes para la regresión hiperbólica

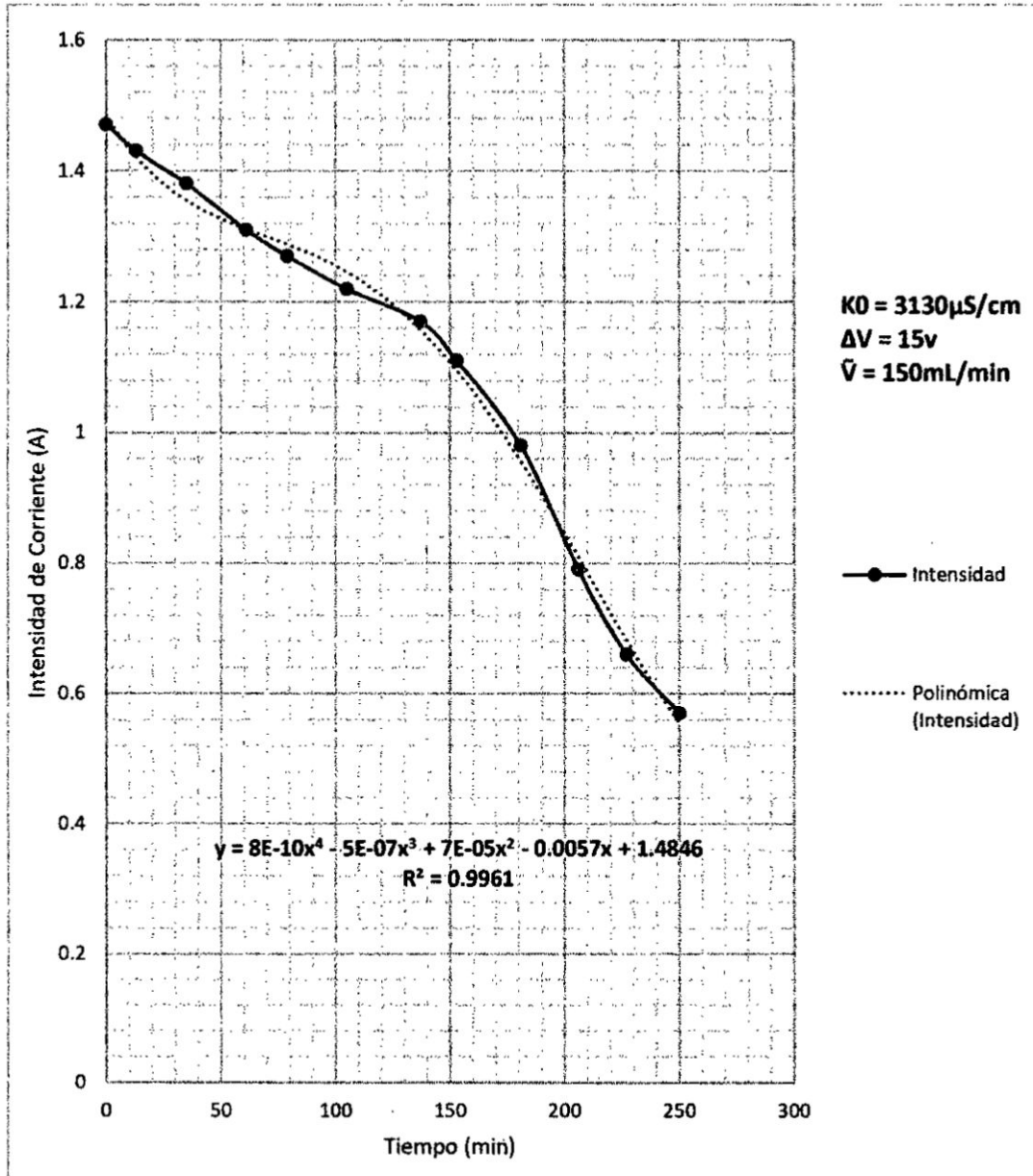
Regresión Hiperbólica	Concentrado	Diluido
A	53,1	94,75
B	1000	-2500
R <sup>2</sup>	0,9907	0,9988

Fuente: Elaboración propia



La intensidad de corriente eléctrica respecto al tiempo se desarrolló:

**Gráfica 5.54**  
Variación de la Conductividad Eléctrica VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Resultados de la calidad del agua de los diluidos finales al terminar la electrodiálisis

Al terminar de desmineralizar las muestras de purga de caldero mediante un módulo de electrodiálisis, se realizaron los mismos análisis de campo que se hicieron a las muestras originales para las 2 rondas experimentales de 9 muestras cada una.

#### 5.3.1 Calidad del agua de los diluidos finales de la 1° Ronda de pruebas experimentales

Para la 1° ronda experimental se obtuvieron:

**Tabla 5.79**  
Diluidos obtenidos mediante electrodiálisis

MUESTRAS 1° Ronda	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1391	1090	1087
TDS (ppm)	695,5	545	543,5
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	5	8	1
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	150	130	160
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	90	70	100
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	30	10	40
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	425	335	275
Hierro Total (ppm $\text{Fe}^{+3}$ )	< 0,01	< 0,01	< 0,01
pH	10,34	10,95	8,18
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.80****Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis**

MUESTRAS 1° Ronda	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1315	1776	1301
TDS (ppm)	657,5	888	650,5
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	2	10	<1
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	140	230	340
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	90	180	180
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	40	130	20
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	235	405	325
Hierro Total (ppm $\text{Fe}^{+3}$ )	< 0,01	< 0,01	< 0,01
pH	9,58	8,86	8,26
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.81****Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis**

MUESTRAS 1° Ronda	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1909	2141	1261
TDS (ppm)	954,5	1070,5	630,5
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	4	3	1
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	330	370	260
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	220	280	80
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	110	130	100
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	340	355	340
Hierro Total (ppm $\text{Fe}^{+3}$ )	< 0,01	< 0,01	< 0,01
pH	8,88	10,23	8,23
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2 Calidad del agua de los diluidos finales de la 2° Ronda de pruebas experimentales

Para la 2° ronda experimental se obtuvieron:

**Tabla 5.82**  
Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis

MUESTRAS 2° Ronda	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1642	1049	978
TDS (ppm)	821	524,5	489
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	9	6	2
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	180	110	190
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	150	80	110
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	120	50	30
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	325	235	205
Hierro Total (ppm $\text{Fe}^{+3}$ )	< 0,01	< 0,01	< 0,01
pH	9,71	8,72	8,13
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.83**  
Muestras a desmineralizar mediante electrodiálisis

MUESTRAS 2° Ronda	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	2010	1466	1964
TDS (ppm)	1005	733	982
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	14	5	7
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	260	250	310
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	190	150	200
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	130	50	90
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	285	265	445
Hierro Total (ppm $\text{Fe}^{+3}$ )	< 0,01	< 0,01	< 0,01
pH	8,16	9,83	7,96

Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora
------------	----------	----------	----------

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.84**

**Muestras a purificar mediante electrodiálisis**

MUESTRAS 2° Ronda	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1530	2280	1226
TDS (ppm)	765	1140	613
Dureza Total (ppm $\text{CaCO}_3$ )	2	9	3
Alcalinidad M (ppm $\text{CaCO}_3$ )	230	390	280
Alcalinidad P (ppm $\text{CaCO}_3$ )	180	240	180
Alcalinidad OH (ppm $\text{CaCO}_3$ )	130	90	80
Cloruros (ppm $\text{Cl}^-$ )	320	475	435
Hierro Total (ppm $\text{Fe}^{+3}$ )	0,02	0,05	0,03
pH	7,26	9,68	8,23
Apariencia	Incolora	Incolora	Incolora

Fuente: Elaboración propia

Siendo así que después de 250 minutos, fue el resultado final de los diluidos producido en las 9 corridas experimentales con sus respectivos duplicados en los 3 niveles experimentales planteados.

Siendo que para su reuso como agua alimentación para el caldero industrial, la desmineralización mediante un módulo electrodiálisis durante 250 minutos es insuficiente para reutilizar estos efluentes para este fin. (véase Tabla 2.2)

Mientras que las muestras 3, 5, 6, 7 y 9 de la 1° ronda experimental y las muestras 2,3,4,6,7 y de la 2° ronda experimental, están aptas para su desecho a la red pública de alcantarillado según Valores Máximos Admisibles de las descargas de agua residuales NO domésticas en el sistema de alcantarillado – DS N° 021 - - 2009 – VIVIENDA (véase, ANEXO 02), al ser desmineralizada durante 250 minutos por un módulo de electrodiálisis.

La 1° hipótesis específica planteada fue: "Controlando el potencial eléctrico en la operación de un módulo de electrodiálisis se podrá desmineralizar el agua de purga de un caldero" (véase, Anexo 01); y para poder conjeturar algo se reagrupó los resultados de la siguiente manera:

**Tabla 6.3**  
Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 5v

<b>RONDA 1</b> <b>- Prueba</b>	<b>Voltaje</b> <b>(v) - ΔV</b>	<b>Caudal</b> <b>Operación</b> <b>(mL/min) - V</b>	<b>Conductividad</b> <b>Eléctrica Inicial</b> <b>(μS/cm) - K0</b>	<b>% Separación de</b> <b>Sales (%SS)</b>
1	5	120	2910	55.30%
2	5	150	5970	68.02%
3	5	180	9120	88.05%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>70.46%</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.4**  
Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 10v

<b>RONDA 1</b> <b>- Prueba</b>	<b>Voltaje</b> <b>(v) - ΔV</b>	<b>Caudal</b> <b>Operación</b> <b>(mL/min) - V</b>	<b>Conductividad</b> <b>Eléctrica Inicial</b> <b>(μS/cm) - K0</b>	<b>% Separación de</b> <b>Sales (%SS)</b>
6	10	180	3200	66.03%
4	10	120	5790	63.02%
5	10	150	8980	84.51%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>71.19%</b>

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 6.5**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 15v

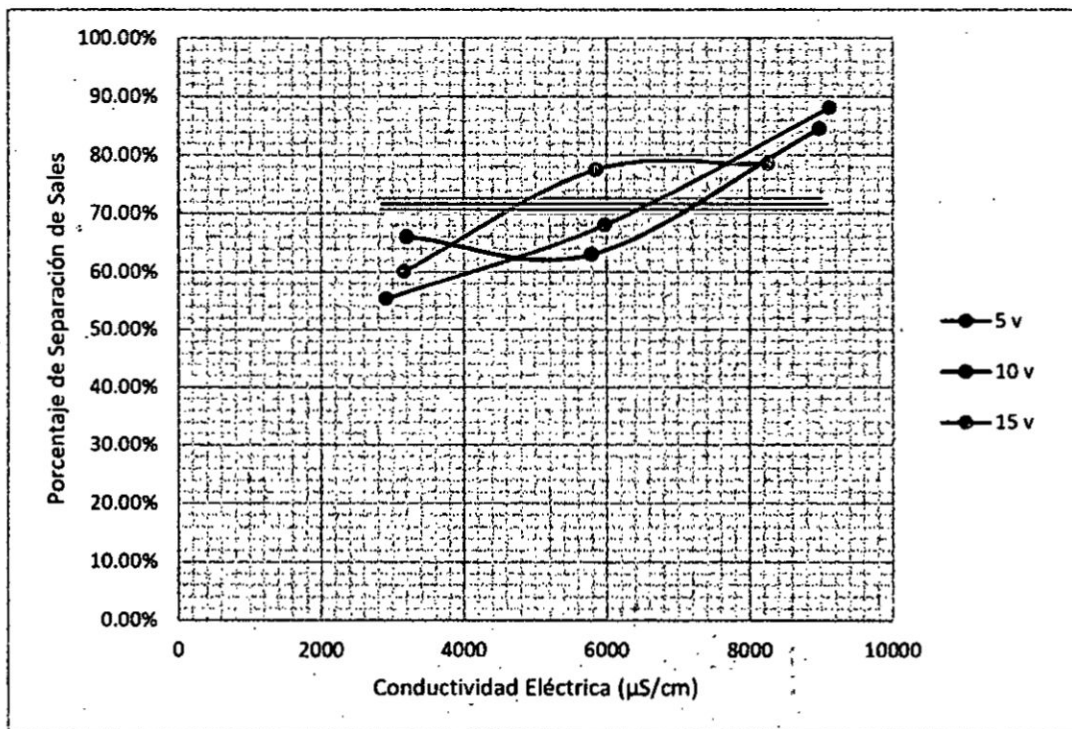
<b>RONDA 1 - Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - ΔV</b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - V</b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (μS/cm) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
8	15	150	3160	60.10%
9	15	180	5850	77.52%
7	15	120	8260	78.52%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>72.05%</b>

Fuente: Elaboración propia

Graficando los resultados de la 1° ronda experimental para cada nivel de voltaje utilizado:

**Gráfica 6.1**

% Separación de Sales vs Conductividad Eléctrica a cada voltaje - 1° Ronda Experimental



Fuente: Elaboración propia

La indefinida tendencia de las gráficas a cada voltaje -  $\Delta V$  se debe a que para cada experimento diseñado varían a distintos niveles las otras 2 variables; la conductividad eléctrica inicial -  $K_0$  y el flujo de alimentación-  $\bar{V}$ , para cada prueba. Aun así, se observa el % Separación de sales promedio es mayor entre más alto es el voltaje. Esto se corrobora con los resultados de la 2° ronda experimental.

**Tabla 6.6**  
Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 5v

<b>RONDA 2 - Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu S/cm</math>) - <math>K_0</math></b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
1	5	120	3270	53.21%
2	5	150	6120	67.91%
3	5	180	9080	88.45%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>69.86%</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.7**  
Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 10v

<b>RONDA 2 - Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu S/cm</math>) - <math>K_0</math></b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
6	10	180	2920	66.51%
4	10	120	6070	62.42%
5	10	150	9030	81.82%



2.3	5	180	9080	88.45%
1.3	5	180	9120	88.05%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>70.16%</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.10**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 10v

Ronda. Prueba	Voltaje (v) - ΔV	Caudal Operación (mL/min) - V	Conductividad Eléctrica Inicial (μS/cm) - K0	% Separación de Sales (%SS)
2.6	10	180	2920	66.51%
1.6	10	180	3200	66.03%
1.4	10	120	5790	63.02%
2.4	10	120	6070	62.42%
1.5	10	150	8980	84.51%
2.5	10	150	9030	81.82%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>70.72%</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.11**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 15v

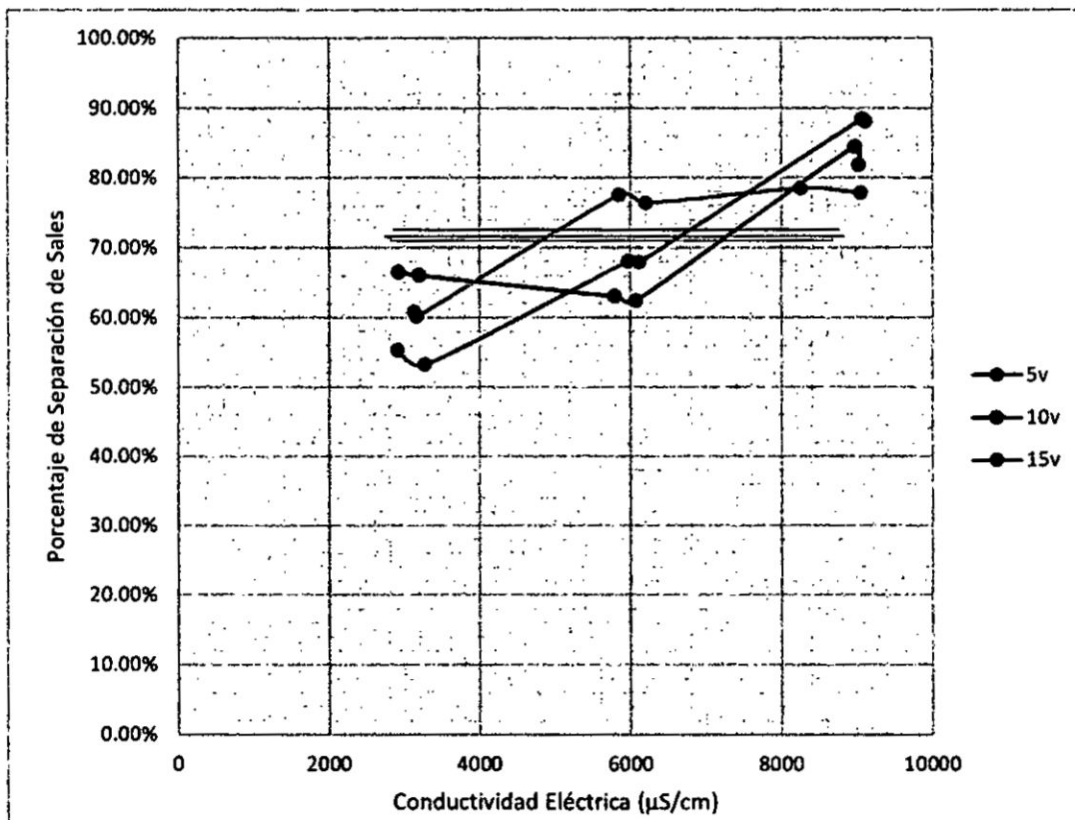
Ronda. Prueba	Voltaje (v) - ΔV	Caudal Operación (mL/min) - V	Conductividad Eléctrica Inicial (μS/cm) - K0	% Separación de Sales (%SS)
2.8	15	150	3130	60.81%

1.8	15	150	3160	60.10%
1.9	15	180	5850	77.52%
2.9	15	180	6210	76.39%
1.7	15	120	8260	78.50%
2.7	15	120	9060	77.81%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>71.86%</b>

Fuente: Elaboración propia

Graficando los resultados de las rondas experimentales combinadas para cada nivel de voltaje utilizado:

**Gráfica 6.3**  
% Separación de Sales vs Conductividad Eléctrica a cada Voltaje– Rondas experimentales combinadas



Fuente: Elaboración propia

Corroborándose la tendencia de que a mayor voltaje se obtiene en promedio un mayor %Separación de Sales, variando la conductividad eléctrica inicial y el flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis.

### 6.1.2 Contraste con la 2° hipótesis específica

La 2° hipótesis específica planteada fue: "Se puede establecer con cual conductividad eléctrica inicial en el agua de purga de caldero se logra una mejor desmineralización usando un módulo de electrodiálisis." (véase, Anexo 01); y para poder conjeturar algo se reagrupó los resultados de la siguiente manera:

**Tabla 6.12**  
Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel bajo de conductividad eléctrica

<b>RONDA 1 - Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
1	5	120	2910	55.30%
6	10	180	3200	66.03%
8	15	150	3160	60.10%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>60.48%</b>
<b>Conductividad Eléctrica Promedio (<math>\mu S/cm</math>) - K</b>				<b>3090</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.13**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel medio de conductividad eléctrica

<b>RONDA 1 - Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\check{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
2	5	150	5970	68.02%
4	10	120	5790	63.02%
9	15	180	5850	78.52%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>69.86%</b>
<b>Conductividad Eléctrica Promedio (<math>\mu S/cm</math>) - K</b>				<b>5870</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.14**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel alto de conductividad eléctrica

<b>RONDA 1 - Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\check{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
3	5	180	9120	88.05%
5	10	150	8980	84.51%
7	15	120	8260	78.50%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>83.69%</b>
<b>Conductividad Eléctrica Promedio (<math>\mu S/cm</math>) - K</b>				<b>8787</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.17**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental al Nivel alto de conductividad eléctrica

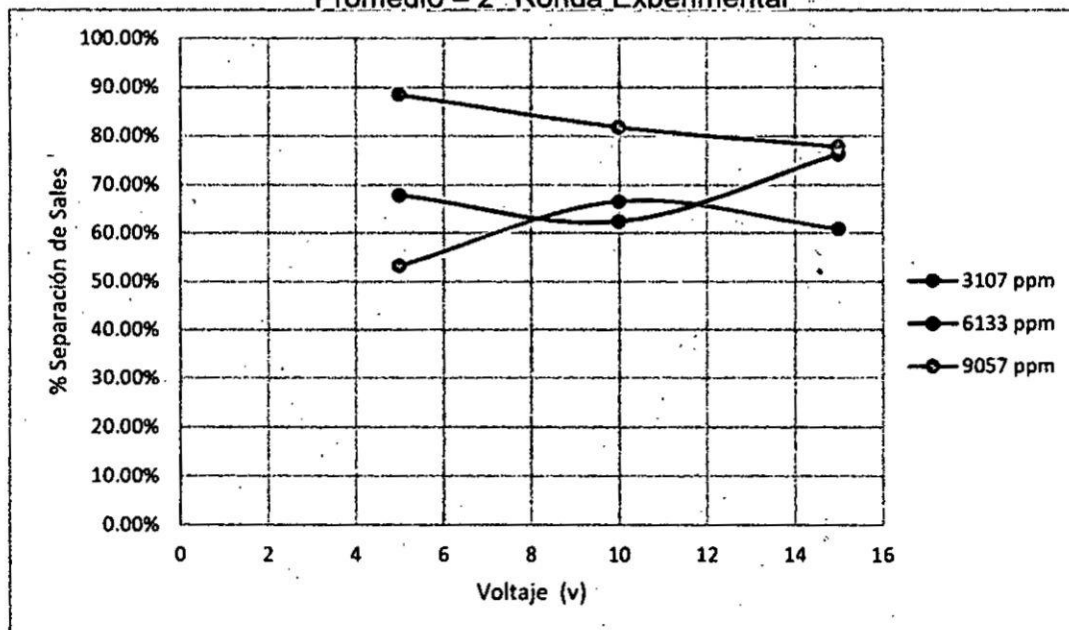
RONDA 2 - Prueba	Voltaje (v) - ΔV	Caudal Operación (mL/min) - V	Conductividad Eléctrica Inicial (μS/cm) - K0	% Separación de Sales (%SS)
3	5	180	9080	88.45%
5	10	150	9030	81.82%
7	15	120	9060	77.81%
<b>Promedio del % Separación de Sales</b>				<b>82.69%</b>
<b>Conductividad Eléctrica Promedio (μS/cm) - K</b>				<b>9057</b>

Fuente: Elaboración propia

Graficando los resultados de la 2° ronda experimental para cada nivel de conductividad eléctrica promedio utilizado:

**Gráfica 6.5**

Gráfica % Separación de Sales vs Voltaje a cada Conductividad Eléctrica Promedio - 2° Ronda Experimental



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que debido a la indefinida tendencia de Gráfica 6.4 y Gráfica 6.5, no se puede conjeturar alguna correspondencia y al comparar con otras investigaciones como en ABO – GHANDER, N; RAHMAN, S; ZAIDI, S. (2005). A Modified Electrodialytic Cell to Recover Heavy Metals from Wastewater, y en MEDINA, I. (2007). Tratamiento de Aguas de Producción con Electrodiálisis; se determinaron que a menor conductividad eléctrica debe haber un mayor porcentaje de separación de sales, pero las pruebas realizadas en esas investigaciones fueron hechas modificando sólo una de las otras variables ya sea o el voltaje –  $\Delta V$  o el flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis -  $\bar{V}$ ; y además de que en esas investigaciones se utilizaron muestras sintéticas hechas en laboratorio, mas no reales.

Realizando una comparación entre los % Separación de Sales logrados a cada conductividad eléctrica promedio, si se ven la siguiente correspondencia.

**Tabla 6.18**  
Comparación del Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a la conductividad eléctrica promedio

<b>RONDA EXPERIMENTAL 1</b>		<b>RONDA EXPERIMENTAL 2</b>	
<b>Conductividad Eléctrica Promedio (<math>\mu\text{S/cm}</math>) - K</b>	<b>Promedio del %Separación de Sales</b>	<b>Conductividad Eléctrica Promedio (<math>\mu\text{S/cm}</math>) - K</b>	<b>Promedio del %Separación de Sales</b>
3090	60.48%	3107	60.18%
5870	69.86%	6133	68.91%
8787	83.69%	9057	82.69%

Fuente: Elaboración propia

Gracias a esta agrupación de operación a mismas variaciones de voltaje –  $\Delta V$  y el flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis -  $\bar{V}$  y a conductividades eléctricas promedio de similar magnitud si registra la tendencia de a menor conductividad eléctrica habrá un mayor % separación de sales.

### 6.1.3 Contraste con la 3° hipótesis específica

La 3° hipótesis específica planteada fue: “Es posible determinar con cual flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis se logrará una mejor desmineralización del agua de purga de caldero.” (véase, Anexo 01); y para poder conjeturar algo se reagrupó los resultados de la siguiente manera:

**Tabla 6.19**  
Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 120mL/min

<b>RONDA 1</b> <b>- Prueba</b>	<b>Voltaje (v)</b> <b>- <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal</b> <b>Operación</b> <b>(mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad</b> <b>Eléctrica Inicial</b> <b>(<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación</b> <b>de Sales (%SS)</b>
1	5	120	2910	55.30%
4	10	120	5790	63.02%
7	15	120	8260	78.50%

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 6.20**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 150mL/min

<b>RONDA 1 - Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
8	15	150	3160	60.10%
2	5	150	5970	68.02%
5	10	150	8980	84.51%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.21**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 180mL/min

<b>RONDA 1 - Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
6	10	180	3200	66.03%
9	15	180	5850	77.52%
3	5	180	9120	88.05%

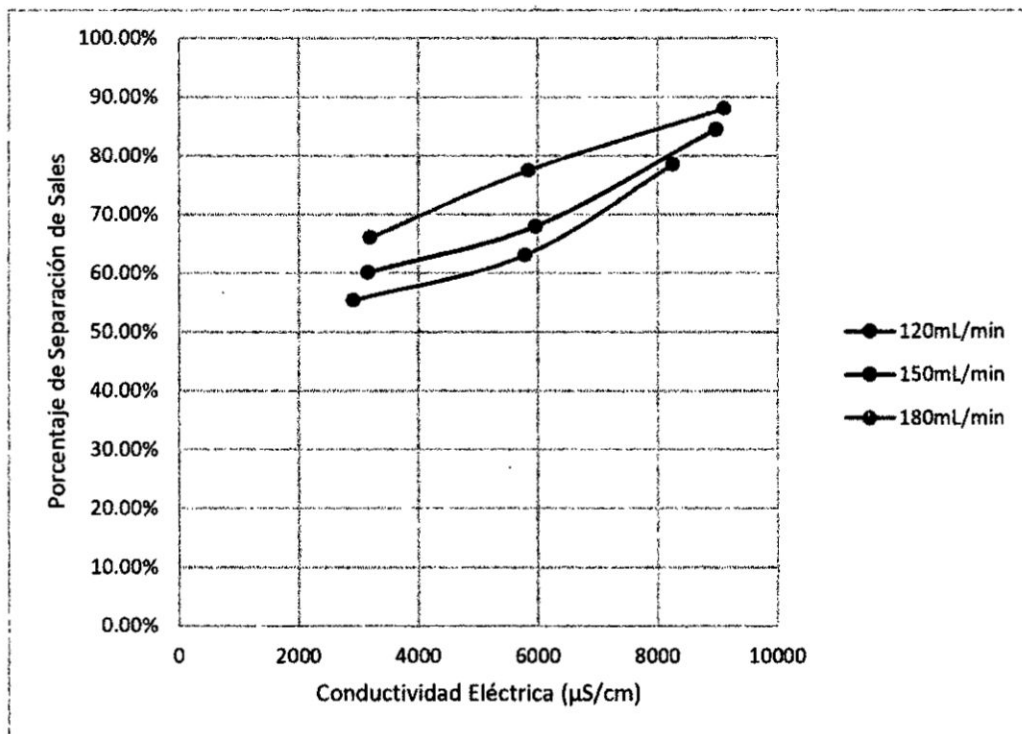
Fuente: Elaboración propia



Graficando los resultados de la 1° ronda experimental para cada nivel de flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis utilizado:

**Gráfica 6.6**

**% Separación de Sales vs Conductividad Eléctrica a cada Flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis – 1° Ronda Experimental**



Fuente: Elaboración propia

La tendencia de las gráficas a cada el flujo de alimentación -  $\dot{V}$  son bien definidas cuando varían a distintos niveles las otras 2 variables; la conductividad eléctrica inicial -  $K_0$  y voltaje -  $\Delta V$ , para cada prueba. Siendo ascendente el % separación de sales a mayor flujo de alimentación -  $\dot{V}$ . Esto se corrobora con los resultados de la 2° ronda experimental.

**Tabla 6.22**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 120mL/min

<b>RONDA 2</b> <b>- Prueba</b>	<b>Voltaje (v)</b> <b>- <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal</b> <b>Operación</b> <b>(mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad</b> <b>Eléctrica Inicial</b> <b>(<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación</b> <b>de Sales (%SS)</b>
1	5	120	3270	53.21%
4	10	120	6070	62.42%
7	15	120	9060	77.81%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.23**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 150mL/min

<b>RONDA 2</b> <b>- Prueba</b>	<b>Voltaje</b> <b>(v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal</b> <b>Operación</b> <b>(mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad</b> <b>Eléctrica Inicial</b> <b>(<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación</b> <b>de Sales (%SS)</b>
8	15	150	3130	60.81%
2	5	150	6120	67.91%
5	10	150	9030	81.82%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.24**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 180mL/min

<b>RONDA 2</b> <b>- Prueba</b>	<b>Voltaje</b> <b>(v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal</b> <b>Operación</b> <b>(mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad</b> <b>Eléctrica Inicial</b> <b>(<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación</b> <b>de Sales (%SS)</b>
6	10	180	2920	66.51%

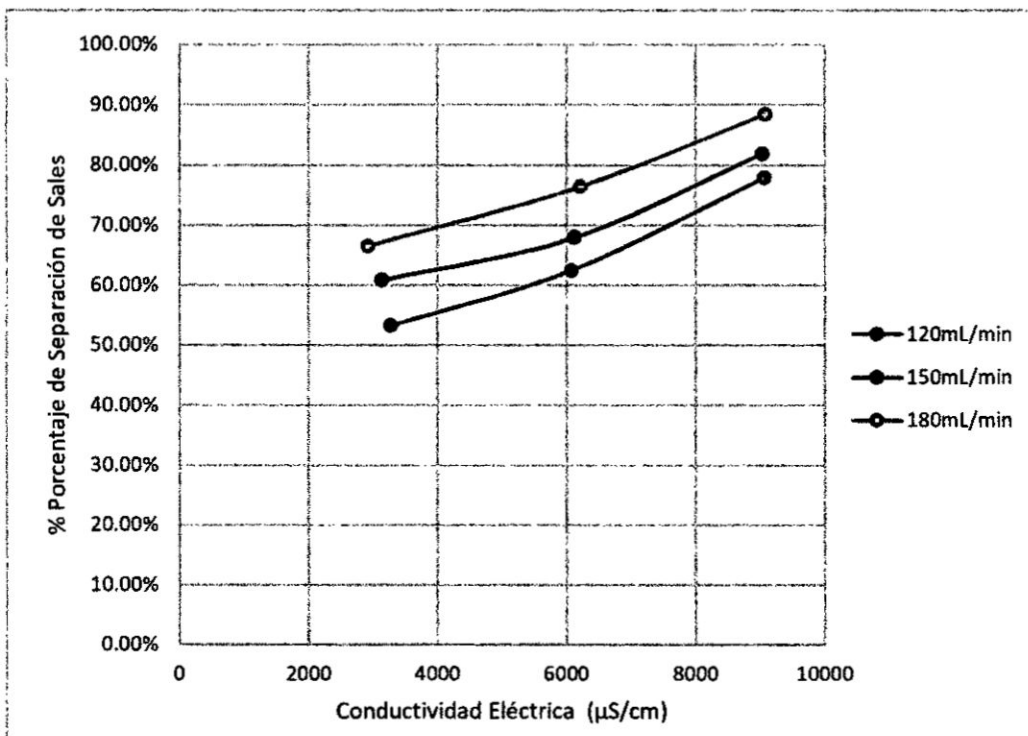
9	15	180	6210	76.39%
3	5	180	9080	88.45%

Fuente: Elaboración propia

Graficando los resultados de la 2° ronda experimental para cada nivel de flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis utilizado:

**Gráfica 6.7**

% Separación de Sales vs Conductividad Eléctrica a cada Flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis – 2° Ronda Experimental



Fuente: Elaboración propia

Al combinar los resultados de ambas rondas experimentales dejando constante el flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis -  $\bar{V}$  y dando una tendencia creciente al voltaje -  $\Delta V$ , se observó que esta tendencia se mantenía:

**Tabla 6.25.**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 120mL/min

Ronda. Prueba	Voltaje (v) - $\Delta V$	Caudal Operación (mL/min) - V	Conductividad Eléctrica Inicial ( $\mu S/cm$ ) - K0	% Separación de Sales (%SS)
1.1	5	120	2910	55.30%
2.1	5	120	3270	53.21%
1.4	10	120	5790	63.02%
2.4	10	120	6070	62.42%
1.7	15	120	8260	78.50%
2.7	15	120	9060	77.81%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.26.**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 150mL/min

Ronda. Prueba	Voltaje (v) - $\Delta V$	Caudal Operación (mL/min) - V	Conductividad Eléctrica Inicial ( $\mu S/cm$ ) - K0	% Separación de Sales (%SS)
2.8	15	150	3130	60.81%
1.8	15	150	3160	60.10%
1.2	5	150	5970	68.02%
2.2	5	150	6120	67.91%
1.5	10	150	8980	84.51%
2.5	10	150	9030	81.82%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.27**  
 Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a  
 180mL/min

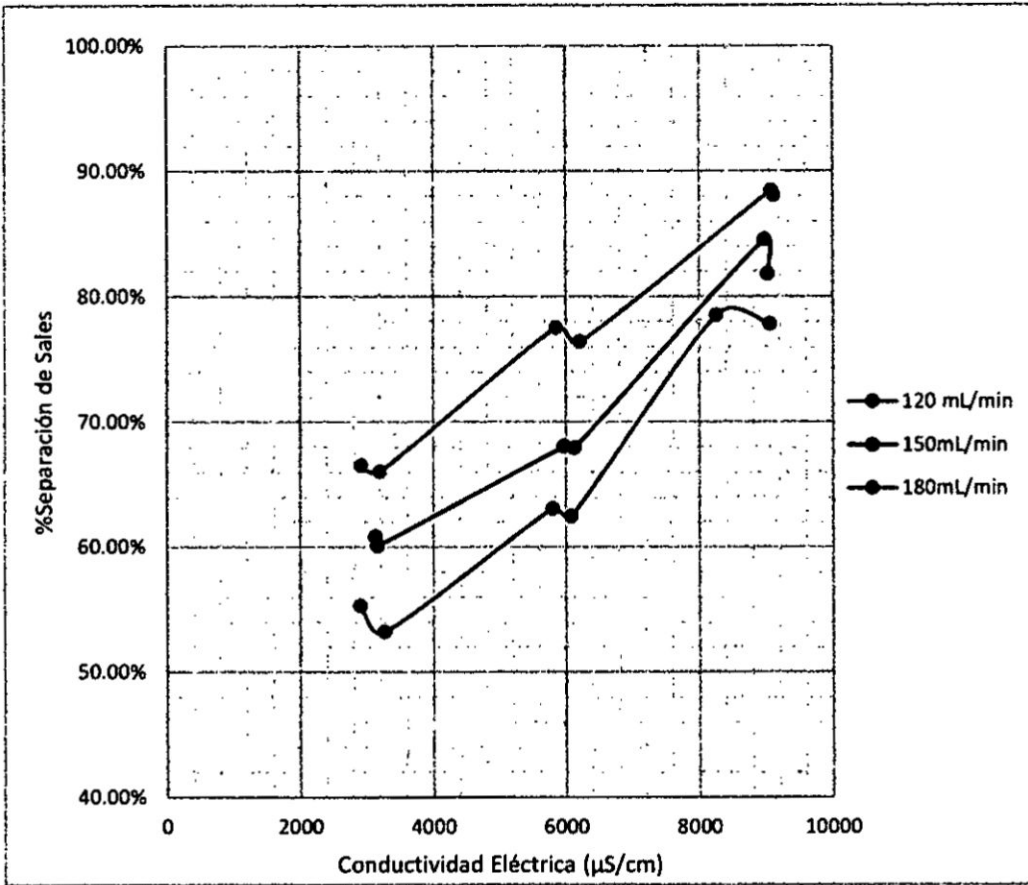
<b>Ronda. Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\bar{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu S/cm</math>) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
2.6	10	180	2920	66.51%
1.6	10	180	3200	66.03%
1.9	15	180	5850	77.52%
2.9	15	180	6210	76.39%
2.3	5	180	9080	88.45%
1.3	5	180	9120	88.05%

Fuente: Elaboración propia

Graficando los resultados de las rondas experimentales combinadas  
 para cada nivel de flujo de alimentación utilizado:

**Gráfica 6.8**

**% Separación de Sales vs Conductividad Eléctrica a cada Flujo de Alimentación – Rondas experimentales combinadas**



Fuente: Elaboración propia

Asimismo, al combinar los resultados de ambas rondas experimentales dejando constante el flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis -  $\bar{V}$  y dando una tendencia creciente a la conductividad eléctrica inicial -  $K_0$ , se observó que esta tendencia se mantenía:

**Tabla 6.28**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 120mL/min

Ronda. Prueba	Voltaje (v) - $\Delta V$	Caudal Operación (mL/min) - $\bar{V}$	Conductividad Eléctrica Inicial (μS/cm) - $K_0$	% Separación de Sales (%SS)
1.1	5	120	2910	55.30%

2.1	5	120	3270	53.21%
2.8	15	150	3130	60.81%
1.8	15	150	3160	60.10%
2.6	10	180	2920	66.51%
1.6	10	180	3200	66.03%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>60.33%</b>
<b>Conductividad Eléctrica Promedio (<math>\mu\text{S/cm}</math>) - K</b>				<b>3098</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.29**  
Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a  
150mL/min

<b>Ronda. Prueba</b>	<b>Voltaje (v) <math>\Delta V</math></b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - V</b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu\text{S/cm}</math>) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
1.4	10	120	5790	63.02%
2.4	10	120	6070	62.42%
1.2	5	150	5970	68.02%
2.2	5	150	6120	67.91%
1.9	15	180	5850	77.52%
2.9	15	180	6210	76.39%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>69.21%</b>
<b>Conductividad Eléctrica Promedio (<math>\mu\text{S/cm}</math>) - K</b>				<b>6002</b>

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 6.30**

Porcentaje de separación obtenido en cada prueba experimental a 180mL/min

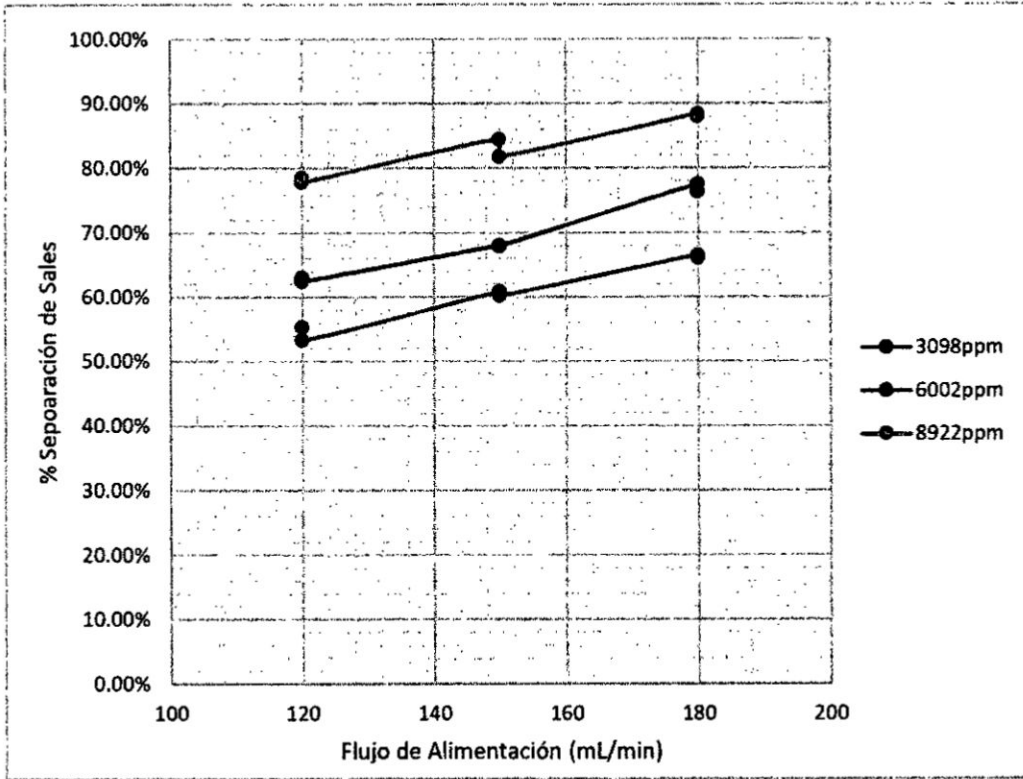
<b>Ronda. Prueba</b>	<b>Voltaje (v) - ΔV</b>	<b>Caudal Operación (mL/min) - <math>\dot{V}</math></b>	<b>Conductividad Eléctrica Inicial (<math>\mu</math>S/cm) - K0</b>	<b>% Separación de Sales (%SS)</b>
1.7	15	120	8260	78.50%
2.7	15	120	9060	77.81%
1.5	10	150	8980	84.51%
2.5	10	150	9030	81.82%
2.3	5	180	9080	88.45%
1.3	5	180	9120	88.05%
<b>Promedio del %Separación de Sales</b>				<b>83.19%</b>
<b>Conductividad Eléctrica Promedio (<math>\mu</math>S/cm) - <math>\bar{K}</math></b>				<b>8922</b>

Fuente: Elaboración propia

Graficando los resultados de las rondas experimentales combinadas para cada nivel de flujo de alimentación utilizado:



**Gráfica 6.9**  
**% Separación de Sales vs Conductividad Eléctrica a cada**  
**Flujo de Alimentación – Rondas experimentales**  
**combinadas**



Corroborándose la tendencia de que, a mayor flujo de alimentación del módulo de electrodiálisis, se obtiene en promedio un mayor %Separación de Sales, variando la conductividad eléctrica inicial y el voltaje.

Así pues, se conoce que mientras se mantengan dentro de los rangos de operación del módulo de electrodiálisis; a menor Conductividad Eléctrica Inicial, mayor Potencial Eléctrico y mayor Flujo de Alimentación influirán en la obtención de un mayor % Separación de Sales.

### **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

Esta investigación es un aporte novedoso ya que no hay investigaciones que analicen la influencia de los parámetros de operación de un módulo de

electrodiálisis para desmineralizar una muestra real de múltiples y cuantitativamente variables componentes, pocas investigaciones como BANASIAK, L; KRUTTSCHNITT, T; SCHÄFER, A. (2008). *Desalination using Electrodialysis as a Function of Voltage and Salt Concentration*, PRONK, W; ZULEEG, Z y Otros (2009). *Pilot Experiments with Electrodialysis an Ozonation for Production of Fertilizer from Urine*. Duebendorf, Switzerland. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, HAN, C; LIU, Y; ZHAO, T; JING, G. (2009). *Reclamation of the Polymer – Flooding Produced Water*; ó MEDINA, I. (2007). *Tratamiento de Aguas de Producción con Electrodiálisis*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela realizan muy minuciosos seguimientos de la concentración de componentes internos de sus muestras, pero solo evalúan la variación de una variable de operación, ya sea la temperatura, la conductividad eléctrica inicial, el potencial eléctrico o el flujo de alimentación a sus módulos de electrodiálisis.

## **CAPITULO VII**

### **CONCLUSIONES**

La investigación permitió llegar a las siguientes conclusiones

- Se determinó que mayores valores del Potencial Eléctrico influyen para obtener un mayor % Separación de Sales a varias condiciones de la Conductividad Eléctrica Inicial y del Flujo de Alimentación al desmineralizar el agua de purga tomadas de muestras de diversos calderos mediante un módulo de electrodiálisis.
- Se estableció que bajo mismas condiciones del Potencial Eléctrico y del Flujo de Alimentación; y a menores valores para la Conductividad Eléctrica Inicial si influye en la obtención de mayores % Separación de sales al desmineralizar muestras el agua de purga obtenidas de diversos calderos.
- Se determinó que mayores Flujos de Alimentación influyen para obtener un mayor % Separación de Sales a varias condiciones de la Conductividad Eléctrica Inicial y del Potencial Eléctrico al desmineralizar el agua de purga proveniente de muestras de varios calderos mediante un módulo de electrodiálisis.
- Se establece que mientras se mantengan dentro de los rangos de operación del módulo de electrodiálisis; a menor Conductividad Eléctrica Inicial, mayor Potencial Eléctrico y mayor Flujo de Alimentación influirán en la obtención de un mayor % Separación de Sales.
- Desmineralizando muestras de agua de purga de 10 calderos de diferentes compañías durante 250 minutos mediante un módulo de electrodiálisis se puede llevar la calidad del agua a una apta para su desecho a la red pública de alcantarillado según los VMA vigentes, a varios parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis.

## CAPITULO IX

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABO – GHANDER, N; RAHMAN, S; ZAIDI, S. (2005). *A Modified Electrodialytic Cell to Recover Heavy Metals from Wastewater*. Dhahran, Saudi Arabia. Electrochemical Research Group, Chemical Department King Fahd University of Petroleum & Minerals.
2. AMERICAN Water Work Asociation Research Foundation; LYONNAISE des Eaux; WATER Commission of South Africa. (1998). *Tratamiento del Agua por Procesos de Membrana, Principios Procesos y Aplicaciones*, 1° Edición. New York, U.S.A. Mc Graw – Hill Inc.
3. ARAYA, R. (2003). *Electrólisis, Electrodiálisis y Celdas Combustibles*. Buenos Aires, Argentina. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
4. BANASIAK, L; KRUTTSCHNITT, T; SCHÄFER, A. (2008). *Desalination using Electrodialysis as a Function of Voltage and Salt Concentration*. Edinburgh, United Kingdom. School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh.
5. BEDIQUI, F; GUTIERREZ, S; ALATORRE, A; ZAGAL, J. (2009) *Electroquímica – Voltametrías sobre Electrodo Sólido*. Santiago de Chile, Chile. Editorial de la Universidad de Santiago de Chile.
6. CASTELLAN, G. (1987) *Fisicoquímica*, Segunda Edición. Massachusetts – U.S.A. Addison Wesley Longman Inc
7. DASSLER, A (1962). *Elektrochemie und ihre Physikalisch - Chemischen Grundlagen*. Berlin, Alemania. Walter Von Gruyter Co.
8. FRAYNE, C; BLAKE, R. (2002) *The Metro Handbook of Water Treatment for HVAC Systems*. New York – U. S. A. The Metro Group, INC.

9. FRAYNE, C. (2002). *Boiler Water Treatment: Boiler Basic and Steam Water Chemistry*. New York – U. S. A. Chemical Publishing CO, INC.
10. FRAYNE, C. (2002). *Boiler Water Treatment: Program Design and Management*. New York – U. S. A. Chemical Publishing CO, INC.
11. HAN, C; LIU, Y; ZHAO, T; JING, G. (2009). *Reclamation of the Polymer – Flooding Produced Water*. *J. Water Resource and Protection*, 1, 1 - 57.
12. *Kurita Handbook of Water Treatment*. Segunda Edición. (2000). Shinjuku, Japón. KURITA Water Industries LTD.
13. LEVINE, I. (2004). *Fisicoquímica Volumen 2*, 5º Edición. New York – U.S.A., Mc Graw – Hill Inc.
14. LÓPEZ REYES, T. (2005). *Diseño, Construcción y Evaluación de un dispositivo para estudiar el transporte en membranas de Intercambio Iónico*. (Tesis de Maestría en Química). Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, México.
15. MARTÍNEZ, Y. (2005). *Electroquímica, Energía y Ambiente*. Mérida, Venezuela. Editorial universitaria de la Universidad de Los Andes.
16. MEDINA, I. (2007). *Tratamiento de Aguas de Producción con Electrodiálisis*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
17. MEDINA, J. (2009). *Desarrollo de Módulos de Electrodiálisis para la Desalinización de Aguas Salobres, Determinación de Parámetros Físicos y Evaluación Experimental de Modelo Difusional*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
18. NALCO Chemical CO: *Manual del Agua su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones* (1999). New York, U.S.A. Mc Graw – Hill Inc.

19. OCHOA, J; CAMINO, B; BELAUSTEGUI, Y; VALLE, B; MARQUINEZ, R. (2003). *Electrodialysis, Ejemplos de Interés Industrial*. Madrid. España. Universidad Alfonso X El Sabio, Departamento de Tecnología Industrial.
20. PANDOLFI, E. (2008). *Aplicación de la Tecnología de Membranas en Proceso de Vinificación*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
21. PRONK, W; ZULEEG, Z y Otros (2009). *Pilot Experiments with Electrodialysis and Ozonation for Production of Fertilizer from Urine*. Duebendorf, Switzerland. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
22. SCHÄFER, A; BANASIAK, L. (2012). *The Removal of Inorganic Trace Contaminants by Electrodialysis in Remote Australian Communities*. Edinburgh, United Kingdom. School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh.
23. SEDAPAL(2011). *Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario D.S. N° 021-2009-VIVIENDA*
24. SIRIVEDHIN, T; MCCUE, J; DALLBAUMAN, L. (2005). *Reclaiming produced water for beneficial use: Salt Removal by Electrodialysis*. *Journal of Membrane Science*, 243 (1 – 2), 335 – 343.
25. *Tratamiento del agua para calderas* (2013). Santiago de Chile, Chile. THERMAL Engineering LTDA.

**ANEXO 01: INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN MÓDULO DE ELECTRODIÁLISIS EN LA DESMINERALIZACIÓN DE AGUA DE PURGA DE CALDERO**

**MATRIZ DE CONSISTENCIA COMPLETA**

<b>PROBLEMA GENERAL</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>METODO</b>
¿Cómo influirán los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis en la desmineralización del agua de purga de un caldero?	Conocer la influencia de los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis para desmineralizar el agua de purga de un caldero.	Conociendo la influencia de los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis se podrá desmineralizar el agua de purga de un caldero.	El porcentaje de separación de sales al final de la desmineralización del agua de purga de un caldero empleando un módulo de electrodiálisis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de separación de sales - %SS</li> <li>• Conductividad eléctrica - K</li> <li>• Sólidos Totales Disueltos - TDS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de Sales - Adimensional</li> <li>• Micro siemens por centímetro - <math>\mu\text{S/cm}</math>.</li> <li>• Partes por millón - ppm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculo del porcentaje de separación de sales al final de la desmineralización.</li> <li>• Monitoreo de la conductividad eléctrica de las muestras durante la operación de electrodiálisis.</li> </ul>
<b>SUB - PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b>	<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>METODO</b>
a) ¿Cuál será el potencial eléctrico necesario para desmineralizar el agua de purga de un caldero mediante un módulo de electrodiálisis?	a) Determinar el potencial eléctrico necesario en la operación de un módulo de electrodiálisis para la desmineralización del agua de purga de caldero.	a) Controlando el potencial eléctrico en la operación de un módulo de electrodiálisis se podrá desmineralizar el agua de purga de un caldero.	El potencial eléctrico para la operación de un módulo de electrodiálisis para desmineralizar el agua de purga de un caldero.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencial eléctrico - <math>\Delta V</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltios - v</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayos experimentales de electrodiálisis a diversos voltajes.</li> </ul>

<p>b) ¿Cuál será la conductividad eléctrica inicial en el agua de purga de un caldero para lograr una mejor desmineralización usando un módulo de electrodiálisis?</p>	<p>b) Establecer la conductividad eléctrica inicial en el agua de purga de un caldero con la cual se logra una mejor desmineralización empleando un módulo de electrodiálisis.</p>	<p>b) Se puede establecer con cual conductividad eléctrica inicial en el agua de purga de caldero se logra una mejor desmineralización usando un módulo de electrodiálisis.</p>	<p>La conductividad eléctrica inicial en el agua de la purga de un caldero que va a ser desmineralizada usando un módulo de electrodiálisis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductividad eléctrica inicial – K<sub>o</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Micro siemens por centímetro - μS/cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medición de la conductividad eléctrica inicial en el agua en diversas muestras de purga de caldero.</li> </ul>
<p>c) ¿Cuál será el flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis para lograr una mejor desmineralización del agua de purga de caldero?</p>	<p>c) Determinar con cual flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis se logrará una mejor desmineralización del agua de un caldero.</p>	<p>c) Es posible determinar con cual flujo de alimentación al módulo de electrodiálisis se logrará una mejor desmineralización del agua de purga de caldero.</p>	<p>El flujo de alimentación del agua de la purga de un caldero que va a ser desmineralizada por un módulo de electrodiálisis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal de alimentación del proceso. - <math>\bar{V}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mililitros por minuto – mL/min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayos experimentales de electrodiálisis a diversos caudales de alimentación.</li> </ul>



**ANEXO 02: VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS** (Fuente: Sedapal)

**VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (VMA) DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS EN EL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO D.S. N° 021-2009-VIVIENDA**

**Art. 1° FINALIDAD, ÁMBITO Y OBLIGATORIEDAD DE LA NORMA**

La presente norma regula mediante Valores Máximos Admisibles (VMA) las descargas de aguas residuales No domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

Los VMA, son aplicables en el ámbito nacional y son de obligatorio cumplimiento para todos los usuarios que efectúen descargas de aguas residuales No domésticas en el alcantarillado sanitario; su cumplimiento es exigible por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento (SEDAPAL).

**Art. 3° DEFINICIÓN DE VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (VMA)**

Entiéndase por Valores Máximos Admisibles (VMA), como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente No doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido en sus parámetros aprobados (Anexo N° 1, y Anexo N° 2) causa daño inmediato o progresivo a las

## **Art. 5° SUSPENSIÓN DEL SERVICIO DE ALCANTARILLADO**

SEDAPAL se encuentra facultada en virtud a la presente norma a imponer el cobro de tarifas aprobadas por la SUNASS e incluso disponer la suspensión del servicio de descargas al sistema de alcantarillado conforme a la regulación prevista en el reglamento y que deriven de la vulneración de los Anexos Tabla N° 01 y N° 02.

## **Art. 9° PROHIBICIONES**

Queda totalmente prohibido descargar directa o indirectamente a los sistemas de alcantarillado aguas residuales o cualquier otro tipo de residuos sólidos líquidos o gaseosos que en razón de su naturaleza, propiedades y cantidad causen por si solos o por interacción con otras descargas algún tipo de daño, peligro e inconvenientes en las instalaciones de los sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales según lo indicado en el reglamento de la presente norma.

## **DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES**

**PRIMERA.-** La presente norma entró en vigencia a partir de la aprobación de su Reglamento mediante el D.S. N° 003-2011-VIVIENDA, vigente a partir del 22 de junio de 2011.

**SEGUNDA.-** Los usuarios que a la fecha de entrada en vigencia del presente D.S., se encuentran efectuando descargas de aguas residuales No domésticas en los sistemas de alcantarillado sanitario, deberán adecuar sus descargas a las disposiciones establecidas en la presente norma, en un plazo no mayor de cinco (05) años.

En el caso de nuevos usuarios del sistema de alcantarillado sanitario las disposiciones de la presente norma son de aplicación inmediata.

#### **Art. 5.- De las obligaciones**

Los Usuarios No Domésticos que descargan aguas residuales No domésticas al sistema de alcantarillado están obligados a:

- a) Presentar anualmente a SEDAPAL la Declaración Jurada de Usuario No Doméstico.
- b) Implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales, cuando sus descargas excedan o puedan exceder los VMA establecidos en el D.S N° 021-2009-VIVIENDA.
- c) Efectuar el pago adicional por exceso de concentración de los parámetros fijados en el Anexo N° 1 del D.S N° 021-2009-VIVIENDA, de acuerdo a la metodología establecida por la SUNASS.
- d) Pagar el Importe correspondiente a la toma de Muestra Inopinada, análisis y cualquier otro gasto relacionado a la labor realizada por el laboratorio acreditado ante INDECOPI, siempre que el valor del parámetro analizado sobrepase los VMA, en caso de no sobrepasar los VMA el importe será asumido por SEDAPAL.
- e) Informar a SEDAPAL, cuando las descargas de sus aguas residuales No domésticas presenten alguna modificación derivada de la ampliación o variación de las actividades que realiza el Usuario No Doméstico, dentro de un plazo que no deberá exceder los quince (15) días hábiles a partir de la ampliación o variación de sus actividades.
- f) Brindar todas las facilidades, accesos e ingresos necesarios para que, en la oportunidad debida, el personal de SEDAPAL o la entidad que haga sus veces y el laboratorio acreditado ante INDECOPI, efectúe la toma de muestra inopinada.

- g) Implementar el mecanismo o dispositivo especial para la toma de muestra inopinada, cuyo costo será asumido por el Usuario No Doméstico.
- h) Asumir los costos asociados al incumplimiento procesos y otras actividades adicionales que estén relacionadas con la implementación de los VMA, de acuerdo al procedimiento establecido por la SUNASS.
- i) Los Usuarios No Domésticos cuyas actividades estén clasificadas según el CIU, deberán declarar, reportar y cumplir con las obligaciones que se establecen en el presente Reglamento, en función de los parámetros que para dichas actividades se establecen en el referido código. Aquellas actividades que no estén incluidas en el CIU, deberán cumplir con los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- j) Cumplir con las demás disposiciones que se emitan para la regulación de la aplicación de los VMA.

## **Capítulo II Derechos de los Usuarios No Domésticos**

### **Art. 6 De los derechos**

Los Usuarios No Domésticos que descargan aguas residuales No domésticas al sistema de alcantarillado sanitario, tienen derecho a:

Recibir información sobre la normatividad, las modificaciones y actualizaciones respecto a los VMA.

A solicitar, de conformidad al artículo 6 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, la exoneración del pago o suspensión del servicio de alcantarillado sanitario, cuando por caso fortuito o fuerza mayor se haya excedido los VMA, de acuerdo con el procedimiento establecido en el artículo 33 del presente reglamento.

Presenciar la toma de muestra inopinada, a participar de dicho acto y a suscribir el Acta de Toma de Muestra Inopinada, cuyo contenido será como mínimo el establecido en el Anexo II del presente reglamento.

Solicitar directamente a cualquier laboratorio acreditado ante INDECOPI, la toma de muestra de parte y los análisis de sus descargas.

Presentar reclamos, si consideran que ha sido vulnerado alguno de sus derechos, de acuerdo a los procedimientos que para tal fin se establezcan.

#### **Artículo 11.- Del pago adicional por exceso de concentración**

SEDAPAL, cobrará a los Usuarios No Domésticos el pago adicional por exceso de concentración cuando haya verificado excesos de los VMA establecidos en el Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009- VIVIENDA, de acuerdo a la metodología establecida por SUNASS.

#### **Artículo 12.- De la oportunidad del cobro**

Cuando SEDAPAL, haya verificado que se ha excedido uno o más de los VMA establecidos en el Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, aplicará lo dispuesto por la SUNASS. Para ello, emitirá el recibo que será remitido al Usuario No Doméstico junto con el costo de los análisis, la toma de muestra inopinada y cualquier otro costo relacionado a la labor del laboratorio acreditado ante el INDECOPI.

La SUNASS emitirá las normas correspondientes para tal efecto, debiendo precisar los temas referidos a fechas de pago, conceptos facturables, falta de entrega de recibo, entre otros.

### **TÍTULO III OBLIGACIONES Y DERECHOS DE SEDAPAL O LA QUE HAGA SUS VECES**

#### **Capítulo I Obligaciones de SEDAPAL o la que haga sus veces**

**Art. 7.-De las obligaciones:**

- a) Solicitar al Usuario No Doméstico la presentación anual de la Declaración Jurada de Usuario No Doméstico conforme al Anexo I del presente reglamento, según lo establecido en la segunda Disposición Complementaria Final del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- b) Registrar al Usuario No Doméstico una vez revisada y evaluada la Declaración Jurada de Usuarios No Domésticos, conforme al procedimiento establecido en el artículo 17 del presente reglamento.
- c) Emitir pronunciamiento, previa evaluación de la información presentada, y asignar un Código de Usuario No Doméstico.
- d) Pagar el importe correspondiente a la toma de muestra inopinada, análisis y cualquier otro gasto relacionado a la labor realizada por el laboratorio acreditado ante INDECOPI, siempre que el valor del parámetro analizado no sobrepase los VMA; en caso de sobrepasar los VMA el importe será asumido por el Usuario No Doméstico.
- e) Solicitar al Usuario No Doméstico el pago adicional por exceso de concentración de los parámetros por sobrepasar los VMA fijados en el Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, de acuerdo a la Metodología establecida por SUNASS.
- f) Reponer el servicio de alcantarillado sanitario previa verificación del cumplimiento de los parámetros establecidos en el Anexo N° 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- g) Suspender el cobro del pago adicional por exceso de concentración al Usuario No Doméstico, previa verificación del cumplimiento de los parámetros del Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009- VIVIENDA.

- h) Comunicar los Usuarios No Domésticos sobre la normatividad, las modificaciones y actualizaciones respecto a los VMA.
- i) En caso fortuito o fuerza mayor, evaluar si temporalmente procede exonerar al Usuario No Doméstico, previa verificación de cumplimiento de los parámetros o de la suspensión del servicio de descargas del sistema de alcantarillado.
- j) Cobrar a los Usuarios No Domésticos el pago adicional por exceso de concentración, de acuerdo a la metodología establecida por SUNASS, según lo dispone el artículo 4° del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- k) Cumplir con las demás disposiciones que se emitan para regular la aplicación de los VMA.

## **Capítulo II Derechos de SEDAPAL o la que haga sus veces**

### **Art. 8.- De los derechos:**

- a) Solicitar al laboratorio acreditado por INDECOPI que efectúe la Toma de Muestra Inopinada a las descargas del Usuario No Doméstico que, según su criterio, amerite la revisión de uno, dos o más VMA contenidos en los Anexos N° 1 y 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- b) Realizar el estudio para caracterizar el tipo de descarga No doméstica a fin de proponer su evaluación al MVCS, y de ser el caso, modificar y/o actualizar los parámetros contenidos en los anexos N° 1 y 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

## **TÍTULO IV VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES**

### **Capítulo I De las Descargas**

#### **Art.9.- De las descargas permitidas**

Se permitirá la descarga directa de aguas residuales No domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario, sin pago o sanción alguna, siempre que no excedan los VMA establecidos en los Anexos N° 1 y 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

SEDAPAL, o la entidad que haga sus veces, en cumplimiento del artículo 7 del D.S. N° 021-2009- VIVIENDA, verificará el cumplimiento de los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y 2 del mencionado Decreto Supremo.

**Art. 10.- De las descargas no permitidas**

No está permitido descargar aguas residuales No domésticas al sistema de alcantarillado sanitario, que sobrepasen los VMA establecidos en el N° 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

En cumplimiento del artículo 9 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, concordante con el literal i) del artículo 72 del T.U.O del Reglamento, no está permitido descargar, verter, arrojar o introducir bajo cualquier modalidad al sistema de alcantarillado sanitario, elementos tales como:

- Residuos sólidos
- Material orgánico de cualquier tipo y estado
- Mezclas inflamables, radioactivas, explosivas, corrosivas, tóxicas y/o venenosas que provoquen daño al sistema de alcantarillado.
- Aquellas descargas que puedan causar obstrucciones físicas, interferencias, perturbaciones
- Residuos sólidos o viscosos, capaces de obstruir el libre flujo.
- Gases procedentes de escapes de motores de cualquier tipo.



- Disolventes orgánicos y pintura, cualquiera sea su proporción o cantidad.
- Carburo calcio y otras sustancias sólidas potencialmente peligrosas, tales como hidruros, peróxidos, clorados, bromatos y sus derivados.
- Hidrocarburos y sus derivados
- Materias colorantes
- Agua salobre
- Residuos que generen gases nocivos.

**RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 025-2011-SUNASS-CD  
METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL PAGO ADICIONAL POR EXCESO  
DE CONCENTRACIÓN DE LOS PARÁMETROS FIJADOS EN ANEXO 1 DEL  
D.S. N° 021-2009-VIVIENDA**

Art. 1°.- Aprobar la metodología para determinación de pago adicional por exceso de concentración respecto de los Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales No domésticas en el sistema de recolección del servicio de alcantarillado y que obra como anexo de la presente resolución.

Art. 3°.- Modificar el artículo 42° del Reglamento de Calidad de la Prestación de los Servicios de Saneamiento, aprobado por Resolución de Consejo Directivo N° 011-2007-SUNASS, de la siguiente manera:

“Artículo 42°.- Descargas en el sistema de recolección del servicio de alcantarillado sanitario”.

Los usuarios no deben descargar, directa o indirectamente, en el sistema de recolección del servicio de alcantarillado, aguas residuales No domésticas o

la transición de estos valores en relación a la dilución de la ciudad y los efectos generados y proyectados en la operación y mantenimiento de la red colectora y plantas de tratamiento de desagüe, con la finalidad de incentivar en los usuarios no domésticos la adecuación de sus sistemas con un pre tratamiento antes de verter sus desagües a la red colectora:

#### Definición de Rangos de Parámetros

RANGO	PARÁMETROS			
	DBO5	DQO	SST	A y G
VMA (mg/L)	500	1000	500	100
Rango 1	500,1-550	1000,1-1100	500,1-550	100,1-150
Rango 2	550,1 - 600	1100,1 - 1200	550,1 - 600	150,1 - 200
Rango 3	600,1 - 1000	1200,1 - 2500	600,1 - 1000	200,1 - 450
Rango 4	1000,1 - 10 <sup>4</sup>	2500,1 - 10 <sup>4</sup>	1000,1 - 10 <sup>4</sup>	450,1 - 10 <sup>3</sup>
Rango 5	> a 10 <sup>4</sup>	> a 10 <sup>4</sup>	> a 10 <sup>4</sup>	> a 10 <sup>3</sup>

### 2. Establecimiento de límite de pago adicional por cada rango

Adicionalmente se establece límites de pago adicional para cada rango establecido:

#### Definición de Límite de Pago Adicional

RANGO	LÍMITE DE PAGO ADICIONAL
Rango 1	25% del importe facturado por servicio de alcantarillado
Rango 2	75% del importe facturado por el servicio de alcantarillado
Rango 3	100% del importe facturado por el servicio de alcantarillado
Rango 4	10 veces del importe facturado por el servicio de alcantarillado
Rango 5	20 veces del importe facturado por el servicio de alcantarillado

### 3. Establecimiento de pesos específicos para cada uno de los parámetros.

La metodología establece pasos específicos para cada uno de los parámetros:

DBO5, DQO, A y G y SST:

### ASIGNACIÓN PORCENTUAL

PARÁMETRO	ASIGNACIÓN PORCENTUAL
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	25%
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	35%
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	20%
Aceites y Grasas	20%

### II Fórmula

El pago adicional a ser aplicado a los usuarios No domésticos que producen agua residual No doméstica con concentraciones de DBO, DQO, SST y Aceites y Grasas por encima de los Valores Máximos Admisibles del Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, en adelante VMA, será aplicado sobre la estructura tarifaria previamente definida entre SEDAPAL y la SUNASS.

Por tanto, únicamente los usuarios que opten por arrojar en la red colectora pública agua residual No doméstica con concentraciones de DBO5, DQO, SST y Aceites y Grasas por encima de los VMA deberán realizar el pago adicional.

### Ecuación 1:

PA =	Importe a facturar por el servicio de alcantarillado	*F
------	--	----

Donde:

PA = Pago adicional

F = Factor de ajuste para calcular el pago adicional