

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
QUÍMICO

**“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA EL  
TRATAMIENTO DE RILES GENERADOS EN LA  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO”**

**Jacqueline Henríquez Herrera**

Profesor Guía:

Carlos Carlesi Jara

**2015**

*Agradecimientos:*

*A mi madre, por apoyarme desde pequeña en todas las decisiones que he tomado y ser la mujer más fuerte que conozco, demostrándome su amor día a día.*

*A mi padre, mi parner el hombre más sabio que conozco, quien me ha enseñado a disfrutar las cosas sencillas de la vida y por su esfuerzo diario para que sus hijos sean profesionales.*

*A mis hermanos, que siempre han estado a mi lado entregándome su cariño y felicidad en mi vida.*

*A mis tatas que están en el cielo cuidándome y ayudándome a lograr mis objetivos.*

*A mis abuelas, que me entregan su amor incondicional y su sabiduría, que hacen que día a día sea mejor persona.*

*A mis tías y tíos, que son mis segundos padres y siempre están apoyándome y me entregan su amor.*

*A mis amigas de la vida, mis hermanas, que han estado conmigo siempre viviendo momentos de mucha felicidad, viajes y hermosos recuerdos que nunca olvidaré.*

*A mis compañeros, con quienes compartí seis años de mucha felicidad y recuerdos que siempre estarán en mi memoria.*

*A los profesores de la Escuela de Ingeniería Química, que han sido parte fundamental en el proceso de mi formación para llegar a ser un profesional.*

*Al profesor Carlos Carlesi Jara, por apoyarme y ser mi profesor guía en las investigaciones y finalmente en la presente tesis.*

## Resumen

La creciente demanda de la sociedad por la descontaminación de aguas residuales de diversos orígenes, materializada en regulaciones cada vez más estrictas, impulsó, en la última década, al estudio de nuevos métodos de tratamiento de aguas riles. Por lo cual en el presente trabajo se realizó un estudio de prefactibilidad económica respecto a la aplicación del proceso Electro-Fenton. Se obtuvo que el costo aplicando el proceso Electro-Fenton fue de 500 [\$/m<sup>3</sup>] y se comparó con el costo aplicando el proceso Fenton el cual fue de 824 [\$/m<sup>3</sup>]. Esto demuestra que la aplicación electroquímica al proceso Fenton implica un menor costo. Luego se realizó una caracterización de los riles generados por la PUCV.

En base a lo anterior, se planteó como objetivo general diseñar y evaluar un proceso para el tratamiento de riles generados en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Por lo tanto la hipótesis planteada se basó en lo siguiente: “instalación de una planta de tratamientos de riles de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso que sea económicamente más factible en comparación con la tercerización a empresa externa y que cumpla con la normativa chilena 609/98”.

Para comprobar esta hipótesis, se llevaron a cabo diferentes experiencias a nivel de laboratorio. Como resultado se obtuvo un proceso en el cual se aplican las técnicas: precipitación alcalina, digestión ácida, neutralización, floculación y el proceso Electro-Fenton. El porcentaje de degradación de los compuestos orgánicos presentes en el ril fue del 98,28%. La cantidad de metales pesados presentes en el efluente tratado fueron de: menor a 0,44 [mg/L] para el arsénico, menor a 0,0165 [mg/L] para el cadmio, 2,5 [mg/L] para el cobre, menor a 0,055 [mg/L] para el níquel, menor a 0,077 [mg/L] para el plomo y de 2,88 [mg/L] para el zinc, los cuales se encuentran bajo el rango establecido por la normativa chilena 609/98.

Luego se estableció el proceso a escala real en base a las cantidades de riles que genera la PUCV anualmente para el diseño de una planta de tratamiento de riles, por lo cual se determinó el costo total de inversión el que fue de: USD 58.789. Finalmente se realizó un análisis de rentabilidad del proyecto comparándolo con el costo que debe pagar la universidad a una empresa externa para que trate estos riles. Los indicadores económicos fueron: VAN el cual fue de USD -14.759 y un TIR de 8,5%, cifras que indican que el proyecto no es rentable en comparación con la tercerización a empresa externa y por ésta razón se rechaza la hipótesis. Sin embargo se realizó un análisis de sensibilidad en el cual se determinó que para hacer rentable el proyecto debe aumentarse en un 8,9% los costos de la empresa externa, siendo éste el ingreso mínimo que debe tener el proyecto en el primer año para que sea rentable. Otra variable influyente es la disminución en un 10,4% en el costo de los equipos, el cual sería el costo mínimo de éstos para que el proyecto sea rentable.

## Abstract

The growing demand for new ways of reducing waste water from different sources it is gaining interest in our society. This can be seen in the tighten regulations on this topic. Because of this, in the last decade new methods for liquid industrial waste treatment have flourished. In this work we realized economic prefeasibility studies for the application of the Electro-Fenton process. It was obtained that the application of the Electro-Fenton process was 500 [\$/m<sup>3</sup>], and this was compared with the application of the Fenton process which was 824 [\$/m<sup>3</sup>]. This shows that the electrochemical application to the Fenton process implies a lower cost. Then it was characterized the liquid industrial waste generated by the PUCV for determine an optimal process for the treatment of these elements.

On the basis of the above, it was fixed as a general objective to design and evaluate a process for the treatment of liquid industrial waste generated in the PUCV. Because of this, the hypothesis is based upon the following: “installation of a treatment plant of liquid industrial waste of the Pontificia Universidad Católica de Valparaíso which could be more economic feasible in comparison with the assistance of an external company, and that can comply with the Chilean norm 609/98.”

In order to prove our hypothesis, we carried on different experiences in laboratory. As a result it was obtained a process in which the following techniques are applied: alkaline precipitation, acid digestion, neutralization, flocculation, and the Electro-Fenton process. The degradation percentage of the organic compounds present in the LIW (liquid industrial waste) was of 98.28%. The quantity of heavy metals present in the treated effluent was: below 0.44 [mg/L] for arsenic, below 0.0165 [mg/L] for cadmium, 2.5 [mg/L] for copper, below 0.055 [mg/L] for nickel, below 0.077 [mg/L] for lead and 2.88 [mg/L] for zinc, these numbers are below the range established by the Chilean norm 609/98.

Then we determined the process in life size based on the total amount of liw that the PUCV generates annually, for the purpose of designing a liw treatment plant, for which it was determined the total cost of the investment, this is: USD 58,789. Finally, it was realized an analysis of profitability of the project compared with the cost that the university actually pays to an external company for this job. The economic indicators were: VAN which was of USD -14,759 and a TIR of 8.5%, numbers that show the project is not profitable in comparison with the outsourcing service provided by an external company, and for this reason the hypothesis is rejected. However, it was realized a sensitivity analysis in which it was determined that for making profitable the project it should be increased in 8.9% the costs for the external company. This is the minimum income that the project must have in order to be profitable. Another important variable it is the decreasing in 10.4% in the equipment costs. This is the minimum cost for these equipments in order that the project could be profitable.

# ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	2
Abstract.....	3
CAPITULO I INTRODUCCIÓN .....	11
1.1. Descripción del problema .....	12
1.2. Importancia de resolver el problema planteado .....	13
1.3. Hipótesis.....	14
1.4. Objetivo General .....	14
1.5. Objetivos Específicos.....	14
CAPITULO II ASPECTOS TEÓRICOS.....	15
2.1. Riles .....	15
2.2. Procesos involucrados en el tratamiento de riles .....	16
2.2.1. Remoción de metales pesados mediante precipitación alcalina.....	16
2.2.2. Tratamiento de digestión ácida .....	17
2.2.3. Neutralización de riles.....	18
2.2.4. Proceso de neutralización y floculación usando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .....	19
2.2.5. Adsorción con carbón activo.....	20
2.3. Producción de gases tóxicos en el proceso.....	21
2.4. Aplicación del proceso Fenton y Electro-Fenton.....	23
2.4.1. Proceso Fenton .....	24
2.4.2. Proceso Electro-Fenton .....	26
2.5. Métodos de análisis.....	27
CAPITULO III RESUMEN DE LAS NORMATIVAS CHILENAS.....	30
3.1. Normas relacionadas con el manejo de riles .....	30
3.2. Normas relacionadas con la instalación de la planta.....	32
CAPITULO IV CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE RILES.....	34

4.1. Caracterización de los riles .....	34
4.1.1. Residuos líquidos halogenados .....	35
4.1.2. Residuos líquidos no halogenados .....	35
4.1.3. Residuos líquidos ácidos .....	36
4.1.4. Residuos líquidos alcalinos o básicos .....	36
4.1.5. Residuos líquidos que contienen metales pesados .....	37
4.2. Cuantificación de los riles.....	38
<b>CAPITULO V TRABAJO EXPERIMENTAL 1 .....</b>	<b>39</b>
5.1. Análisis de consumos en proceso Electro-Fenton.....	39
5.1.1. Aplicación de la reacción Fenton .....	39
5.1.2. Aplicación electroquímica de la reacción Fenton .....	40
5.2. Resultados .....	43
5.2.1. DQO de las muestras.....	43
5.2.2. pH de las muestras .....	45
5.2.3. Absorbancia de las muestras .....	45
5.3. Análisis de factibilidad del proceso Electro-Fenton .....	47
5.3.1. Costos asignados al Proceso Fenton.....	47
5.3.2. Costos asignados al Proceso Electro-Fenton.....	48
5.4. Conclusión .....	49
<b>CAPITULO VI. TRABAJO EXPERIMENTAL 2 .....</b>	<b>50</b>
6.1 Aplicación de los procesos a los riles de la EIQ .....	50
6.2. Resultados .....	54
6.2.1. DQO de las muestras.....	54
6.2.2. pH de las muestras .....	56
6.2.3. Absorbancia de las muestras .....	56
6.2.4. Metales pesados en las muestras .....	58

6.3. Conclusión .....	59
<b>CAPITULO VII TRABAJO EXPERIMENTAL 3 .....</b>	<b>61</b>
7.1. Residuos químicos líquidos utilizados .....	61
7.2. Trampa para gases tóxicos .....	62
7.3. Aplicación del proceso de digestión ácida .....	62
7.4. Aplicación del proceso de precipitación alcalina.....	64
7.5. Aplicación del Proceso Electro-Fenton.....	67
7.6. Aplicación de los procesos de neutralización y floculación .....	68
7.7. Aplicación del proceso de adsorción con carbón activo .....	70
7.8. Resultados .....	71
7.8.1. DQO de las muestras.....	71
7.8.2. pH de las muestras .....	73
7.8.3. Absorbancia de las muestras .....	73
7.8.4. Metales pesados en las muestras .....	75
7.9. Conclusión .....	76
<b>CAPÍTULO VIII DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO PROPUESTO A ESCALA REAL .....</b>	<b>78</b>
8.1. Descripción del proceso de la planta propuesta .....	80
8.2. Balances de masas de los equipos.....	81
8.2.1. Balance de masa al estanque 1 .....	81
8.2.2. Balance de masa al filtro 1 .....	83
8.2.3. Balance de masa al reactor.....	84
8.2.4. Balance de masa al filtro prensa.....	86
8.2.5. Balance de masa al adsorbedor de carbón activo .....	87
8.2.6. Balance de masa a los absorbedores de gases .....	88
<b>CAPITULO IX FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....</b>	<b>90</b>
9.1. Costo de equipos para la estimación de la inversión.....	90

9.2. Costo total del producto .....	95
9.4. Costos de la empresa externa que trata los riles.....	97
9.5. Análisis de rentabilidad.....	98
9.6. Análisis de sensibilidad.....	101
9.7 Conclusión .....	107
CAPITULO X CONCLUSIONES FINALES .....	108
BIBLIOGRAFÍA .....	109

## Lista de Figuras

Figura 1. Aglomeración de partículas coloidales .....	19
Figura 2. Artículos científicos sobre procesos avanzados de oxidación .....	24
Figura 3. Equipo para medir la DQO .....	28
Figura 4. Espectrofotómetro para medir la absorbancia de las muestras .....	28
Figura 5. Espectroscopia de absorción atómica .....	29
Figura 6. Desarrollo experimental para calcular la masa real .....	41
Figura 7. Reactor de capacidad 20 [L] .....	42
Figura 8. Placas instaladas en la parte superior del reactor .....	42
Figura 9. Muestras obtenidas del proceso Fenton .....	43
Figura 10. Muestras obtenidas del proceso Electro-Fenton .....	43
Figura 11. Gráfico comparativo del DQO respecto al tiempo .....	44
Figura 12. Gráfico comparativo del tiempo versus absorbancia de cada muestra a 305 [nm] .....	46
Figura 13. Gráfico comparativo del tiempo v/s absorbancia a 436[nm] .....	46
Figura 14. Conexión del reactor hacia la trampa de gases .....	51
Figura 15. Mezcla de los riles orgánicos con los riles que contienen metales pesados .....	51
Figura 16. Riles ácidos son agregados al reactor .....	52
Figura 17. Aplicación del proceso Electro-Fenton a la mezcla de riles .....	53
Figura 18. Residuos sólidos obtenidos .....	53
Figura 19. Gráfico del tiempo versus DQO del ril tratado .....	55
Figura 20. Gráfico de la longitud de onda [nm] versus absorbancia de las muestras .....	57
Figura 21. Residuos líquidos utilizados en el proceso Experimental 3 .....	61
Figura 22. Conexión del reactor hacia la trampa de gases .....	62
Figura 23. Mezcla de los residuos orgánicos y residuos ácidos .....	63
Figura 24. Lodo precipitado del proceso de digestión ácida .....	64
Figura 25. Mezcla de riles que contienen metales pesados y alcalinos .....	65
Figura 26. Lodo precipitado del proceso de precipitación alcalina .....	66
Figura 27. Efluente obtenido luego del proceso de precipitación alcalina y de digestión ácida .....	66
Figura 28. Conexión del reactor con la fuente de poder .....	67
Figura 29. Efluente luego de la aplicación del proceso Electro-Fenton .....	68
Figura 30. Efluente luego de la aplicación del proceso de neutralización y de floculación .....	69

Figura 31. Proceso de adsorción con carbón activo .....	70
Figura 32. Efluente luego de ser aplicados los procesos descritos.....	70
Figura 33. Muestras obtenidas luego de la aplicación de los procesos descritos.....	71
Figura 34. Gráfico de la variación del DQO de cada muestra .....	72
Figura 35. Gráfico de la variación de la absorbancia de las muestras obtenidas .....	74
Figura 36. Flowsheet de la planta de tratamiento de riles propuesta .....	79
Figura 37. Balance de masa del estanque 1.....	82
Figura 38. Balance de masa al filtro 1.....	83
Figura 39. Balance de masa al reactor .....	85
Figura 40. Balance de masa al filtro prensa .....	86
Figura 41. Balance de masa al adsorbedor de carbón activo .....	87
Figura 42. Representación de los absorbedores de gases.....	88
Figura 43. Reactor disponible en el laboratorio de operaciones unitarias.....	92
Figura 44. Variación del indicador VAN respecto a la variación del ingreso.....	103
Figura 45. Variación del indicador TIR respecto a la variación del ingreso.....	104
Figura 46. Variación del indicador VAN respecto a la disminución % del costo de los equipos.....	106
Figura 47. Variación del indicador TIR respecto a la disminución % del costo de los equipos.....	106

## Lista de Tablas

Tabla 1. Procesos involucrados en la remoción de metales pesados.....	17
Tabla 2. Ventajas de los procesos avanzados de oxidación .....	27
Tabla 3. Límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectúan al alcantarillado ...	31
Tabla 4. Continuación de los límites máximos permitidos .....	32
Tabla 5. Cantidad de riles generados por la PUCV.....	38
Tabla 6. Eficiencias de la DQO en el proceso Fenton y Electro-Fenton.....	44
Tabla 7. Tabla comparativa de cantidad de dinero por m <sup>3</sup> de ril tratado.....	49
Tabla 8. Eficiencia de la DQO aplicando los procesos decritos .....	54
Tabla 9. Comparación del DQO de la muestra con el establecido por la norma .....	55
Tabla 10. Comparación del pH y la temperatura de la muestra con la normativa .....	56
Tabla 11. Porcentajes de reducción de color de las muestras .....	57
Tabla 12. Comparación de metales pesados presentes en el efluente con la normativa chilena.....	59

Tabla 13. Comportamiento de la temperatura durante el proceso de digestión ácida.....	63
Tabla 14. Comportamiento de la temperatura durante el proceso de precipitación alcalina.....	65
Tabla 15. Comportamiento de la temperatura y el pH del efluente .....	69
Tabla 16. Eficiencia del DQO aplicando el proceso Electro-Fenton .....	72
Tabla 17. Comparación del DQO del ril tratado con la normativa .....	72
Tabla 18. Comparación del pH y la temperatura del efluente con normativa.....	73
Tabla 19. Porcentajes de reducción de color a los 305 [nm] y 405 [nm] .....	74
Tabla 20. Comparación de metales pesados presentes en el efluente con la normativa .....	76
Tabla 21. Balance de masa del estanque 1 .....	82
Tabla 22. Balance de masa del filtro 1 .....	83
Tabla 23. Balance de masa al reactor.....	85
Tabla 24. Balance de masa al filtro prensa .....	86
Tabla 25. Balance de masa al adsorbedor de carbón activo.....	87
Tabla 26. Balance de masa a los absorbedores de gases.....	88
Tabla 27 Costo de los equipos de la planta de tratamiento de riles en USD.....	91
Tabla 28. Capital fijo directo en USD.....	93
Tabla 29. Costo total de la instalación de equipos en USD .....	94
Tabla 30. Costos indirectos en USD .....	94
Tabla 31. Total capital de inversión en USD .....	95
Tabla 32. Costo energético de equipos en USD en un año .....	95
Tabla 33. Costo total del Producto en USD en un año.....	96
Tabla 34. Depreciación lineal de los equipos en USD .....	96
Tabla 35. Financiamiento del proyecto en USD .....	96
Tabla 36. Continuación tabla de financiamiento en USD.....	97
Tabla 37. Flujo de caja neto del proyecto .....	99
Tabla 38. Continuación del flujo de caja del proyecto.....	100
Tabla 39. Resultados de los indicadores .....	101
Tabla 40. Análisis de sensibilidad variando el ingreso .....	102
Tabla 41. Análisis de sensibilidad variando el costo de los equipos.....	105

# CAPITULO I INTRODUCCIÓN

La Pontificia Universidad Católica de Valparaíso entrega gran apoyo a las actividades de investigación de variadas carreras, tales como: Instituto de Química (Facultad de Ciencias), Escuela de Ingeniería Bioquímica, Escuela de Agronomía, Escuela de Ingeniería en Alimentos, Escuela de Ingeniería en Construcción, Escuela de Ingeniería Mecánica y la Escuela de Ingeniería Química. Debido al desarrollo experimental en los laboratorios de éstas, en donde se generan residuos líquidos peligrosos (riles), recae la importancia de tratarlos para poder descargar estos efluentes al alcantarillado.

En la actualidad estos residuos son almacenados en una bodega ubicada en Curauma y posteriormente trasladados por la Empresa Brisa, desde Valparaíso a Santiago. Lugar donde se gestiona la aplicación de tratamientos para disminuir los contaminantes presentes en el efluente y así cumplir con los parámetros exigidos por la normativa chilena 609/98, lo cual implica un alto costo para la universidad.

Por esta razón, se realizó un trabajo de investigación para determinar que procesos son efectivos para tratar los residuos líquidos generados por la universidad, siendo la mejor alternativa el proceso de oxidación avanzada denominado “Electro-Fenton”.

Luego se realizó un estudio a nivel de laboratorio, para determinar los pre-tratamientos que son efectivos en la mezcla de los distintos tipos de riles generados por la Escuela de Ingeniería Química y la aplicación del proceso Electro-Fenton, para así dar cumplimiento a la normativa chilena 609/98.

Posteriormente, para realizar dicho proceso, se llevó a cabo un estudio técnico para determinar los requerimientos de equipos necesarios para instalar una planta de tratamiento de riles en las inmediaciones del Campus de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, ubicado en Curauma, fijándose también el monto de la inversión correspondiente para el funcionamiento de ésta.

A modo de finalización, se elaboró un estudio económico para determinar la factibilidad del proyecto, realizándose un análisis comparativo con el proceso empleado en la actualidad en Santiago, por medio de un análisis de sensibilidad, con una proyección de la planta de 15 años.

En conclusión el proceso propuesto cumple con la normativa chilena 609/98, pero instalar una planta de tratamiento de riles en la PUCV no es rentable.

Según el análisis de sensibilidad para que el proyecto sea rentable la Empresa externa debe aumentar el costo de sus servicios o el capital total de inversión debe disminuir.

## 1.1. Descripción del problema

La creciente demanda de la sociedad para la descontaminación de aguas impurificadas de diversos orígenes, materializada en regulaciones cada vez más estrictas ha impulsado, en la última década, al desarrollo de nuevas tecnologías de purificación. En la práctica, la aplicación de los métodos de tratamiento debe tener en cuenta fundamentalmente la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas de las aguas o efluentes a tratar. Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden, en general, ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes o por tratamientos químicos convencionales (oxidación térmica, cloración, ozonización, permanganato de potasio, entre otros). Sin embargo en algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos y cada vez más crecientemente, se está recurriendo, en los países industrializados, al uso de las llamadas Tecnologías o Procesos Avanzados de Oxidación (TAOs o PAOs), muy poco aplicados y, peor aún, menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina. La reacción Fenton es uno de los procesos (PAOs) más utilizado para purificar aguas riles, siendo la aplicación del método electroquímico en la reacción Fenton un proceso estudiado en los últimos tiempos, debido a que aumenta la eficiencia de degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua. Sin embargo existe una incertidumbre económica respecto a la aplicación de este proceso, por lo que en el presente trabajo se realizará un estudio y análisis de prefactibilidad del proceso Electro-Fenton.

En distintos laboratorios de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso se manejan gran cantidad de productos químicos y se efectúan diversas operaciones que conllevan a la generación de residuos líquidos, en la mayoría de los casos peligrosos para la salud y el medio ambiente. Unas adecuadas condiciones de trabajo en el laboratorio implican inevitablemente el control, tratamiento y eliminación de los residuos generados en el mismo, por lo que su gestión es un aspecto imprescindible en la organización de todo laboratorio. En la actualidad los residuos líquidos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso son tratados por una empresa externa ubicada en Santiago lo que implica un elevado costo, motivo por el cual sería de gran conveniencia diseñar un proceso para tratar los riles e instalar una planta de tratamiento de estos en el campus de la PUCV ubicado en Curauma, cumpliendo así con las normativas chilenas pertinentes.

## 1.2. Importancia de resolver el problema planteado

[1] Los residuos líquidos peligrosos contienen frecuentemente contaminantes tóxicos y resistentes a los tratamientos convencionales de aguas residuales, por lo que existe la necesidad de desarrollar tecnologías eficaces para la eliminación de éstos.

Debido a que en las empresas que tratan los residuos líquidos industriales en Latinoamérica no tienen mayor información de los procesos avanzados de oxidación, es necesario realizar un esfuerzo en la investigación y desarrollo de estos tratamientos.

La reacción Fenton es un proceso avanzado de oxidación, en donde las soluciones de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas son capaces de oxidar los ácidos tartárico, málico y otros compuestos orgánicos, donde la formación de  $\text{HO}\cdot$ , sumamente reactivo, ataca a la materia orgánica, lo que ha permitido en la actualidad tratar aguas riles para así alcanzar un alto grado de pureza en las aguas tratadas. La reacción Fenton, ha llevado al estudio de la oxidación electroquímica de ésta, la cual se conoce como Electro-Fenton. El estudio de este proceso ha sido de gran importancia para las empresas que aplican este método, debido a la incertidumbre económica y falta de investigación científica. Por lo tanto, es necesario realizar estudios a nivel de laboratorio sobre la eficiencia de la degradación de compuestos en aguas riles en comparación con otros métodos empleados y sus ventajas económicas.

Debido a que en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso se generan residuos líquidos peligrosos y este centro de estudio tiene gran preocupación por el medio ambiente, se realizan investigaciones de estos procesos avanzados de oxidación. Además hoy en día los riles producidos por las diferentes escuelas de la PUCV son tratados por una empresa externa ubicada en Santiago, lo cual produce un costo elevado. Es por esta razón que existe la necesidad de desarrollar un proceso para la eliminación de estos contaminantes y así la Universidad pueda tratar sus residuos líquidos con eficacia en la degradación de compuestos orgánicos presentes en éstos, alcanzando un alto grado de pureza, generando, al mismo tiempo, una disminución en el aspecto económico y cumpliendo con la normativa chilena 609/98. Para lograr este objetivo, se propone el diseño de una planta de tratamiento de riles para la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

De esta forma se está materializando la visión que tiene la Universidad para invertir en la adquisición de nuevas tecnologías para los tratamientos de sus residuos, con el fin de mejorar su desempeño medioambiental.

### **1.3. Hipótesis**

Instalación de una planta de tratamientos de riles de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso que sea económicamente más factible en comparación con la tercerización a empresa externa y que cumpla con la normativa chilena 609/98.

### **1.4. Objetivo General**

Diseñar y evaluar un proceso para el tratamiento de riles generados en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

### **1.5. Objetivos Específicos**

- a) Desarrollar un análisis teórico de los procesos involucrados en el tratamiento de riles.
- b) Resumir normativas chilenas relacionadas con el tratamiento de riles para la instalación de una planta.
- c) Determinar los requerimientos de retiros de la Universidad
- d) Proponer un procedimiento para tratar los residuos líquidos y que cumplan con la normativa chilena 609/98.
- e) Dimensionar el proceso propuesto a escala real y determinar costos de operación e inversión de la planta.
- f) Determinar factibilidad económica y comparar con los servicios externos empleados en la actualidad por la PUCV.

## CAPITULO II ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1. Riles

[2] Los residuos industriales líquidos son aguas de desecho generadas en establecimientos industriales como resultado de un proceso, actividad o servicio. Las descargas de residuos industriales líquidos se caracterizan por contener elevadas concentraciones de elementos contaminantes.

En la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso se generan distintos tipos de riles, los cuales se pueden clasificar como:

- Residuos químicos líquidos halogenados
- Residuos químicos líquidos no halogenados
- Residuos químicos líquidos ácidos
- Residuos químicos líquidos alcalinos
- Residuos químicos líquidos que contienen metales pesados

Según la tipología de los residuos químicos líquidos generados por la PUCV, se estudiaron los procesos principales para realizar el mezclamiento de éstos y la aplicación del proceso Electro-Fenton para lograr disminuir los contaminantes presentes en el efluente.

[3] Es de gran importancia tener claridad de las características químicas de peligrosidad de los riles generados en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, éstos se pueden clasificar como: corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos o inflamables, por lo tanto, según las características dadas por las hojas de datos de seguridad de estos residuos líquidos y la compatibilidad entre ellos, se estudiaron los principales procesos para tratarlos, los cuales implican la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el ril, la aglomeración de partículas desestabilizadas, la obtención de un pH neutro del agua residual, eliminación de metales pesados, entre otros.

El estudio bibliográfico de los procesos de mezclamiento de residuos químicos líquidos de distintas tipologías tienen gran relevancia, debido a las consecuencias que conlleva esto, tal como, el aumento de la temperatura de las reacciones, los gases producidos que son principalmente de origen ácido y de muy alta toxicidad para el ser humano. Es por ésta razón, que para poder establecer el proceso para tratar los riles de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, se llevó a cabo un estudio de las posibles interacciones entre los diferentes tipos de riles generados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química. Los cuales son de la misma tipología que generan otras escuelas tales como,

Instituto de Química (facultad de ciencias), Escuela de Ingeniería Bioquímica, Escuela de Agronomía, Escuela de Ingeniería en Alimentos, Escuela de Ingeniería en Construcción y Escuela de Ingeniería Mecánica.

## **2.2. Procesos involucrados en el tratamiento de riles**

[4] Los procesos involucrados en el tratamiento primario o pre-tratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga bien en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una digestión, precipitación, neutralización u homogeneización. A continuación se detallarán cada uno éstos tratamientos.

### **2.2.1. Remoción de metales pesados mediante precipitación**

#### **alcalina**

[5] La remoción de metales pesados se realiza por precipitación de formas insolubles del metal en solución en el caudal a tratar. Por precipitación se entiende la desolubilización de una molécula o átomo ionizado que estaba previamente disuelto, seguido de su caída hacia el fondo de un recipiente. La ruta más usual para desolubilizar metales es la formación de hidróxidos metálicos mediante la alcalinización de la solución. La reacción consiste en llevar el efluente con metales disueltos al pH de mínima solubilidad del metal en cuestión (producto de solubilidad). Es de gran importancia considerar que si en el efluente a tratar, en el que está disuelto el metal, existe cianuro o amonio, éstos deben ser removidos antes de tratar los metales pesados. Tanto el cianuro como el amonio pueden cambiar a fase gas al cambiar el pH de la solución. Ambos gases no deben estar presentes en ambientes laborales, debido a su toxicidad. Los metales pesados, en general, pueden precipitarse por la ruta hidróxido (agregar cal); por la ruta sulfuro (agregar sulfuro) o por la ruta carbonato (típicamente el plomo). Según se señaló previamente, se debe buscar formar aquellas sales del metal cuya solubilidad sea escasa, que es el caso de los hidróxidos, los sulfuros o los carbonatos.

En la siguiente tabla 1 se puede observar los efluentes obtenibles mediante diversos procesos en la remoción de metales pesados.

**Tabla 1. Procesos involucrados en la remoción de metales pesados**

<b>Metal</b>	<b>ppm</b>	<b>Tecnología</b>
<b>Arsénico</b>	0,05	Sulfuro y filtración
	0,06	Adsorción en Carbón
	0,005	Co-precipitación con hidróxido férrico
<b>Bario</b>	0,5	Precipitación con sulfato
<b>Cadmio</b>	0,05	Precipitación de hidróxido a pH 10 a 11
	0,05	Co-precipitación con hidróxido férrico
	0,008	Precipitación del sulfuro
<b>Cobre</b>	0,05	Precipitación de hidróxido
	0,02	Precipitación del sulfuro
<b>Mercurio</b>	0,02	Precipitación del sulfuro
	0,005	Co-Precipitación con alúmina
	0,001	Co-Precipitación con férrico
	0,002	Intercambio iónico
<b>Níquel</b>	0,12	Precipitación de hidróxido a pH 10
<b>Selenio</b>	0,05	Precipitación del sulfuro
<b>Zinc</b>	0,1	Precipitación del hidróxido a pH 11

**Nota.** Fuente: Herrera, Leandro. Procesos de neutralización de residuos líquidos industriales (o de abatimiento en riles).

### **2.2.2. Tratamiento de digestión ácida**

[6] En este tipo de tratamiento se llevan a cabo procesos catabólicos oxidativos, se entiende por procesos catabólicos, como la transformación o degradación de las moléculas orgánicas, hasta formar otras moléculas más simples y, finalmente, sustancias inorgánicas. Globalmente son procesos de oxidación en los que las moléculas orgánicas van perdiendo electrones que son captadas por una molécula aceptadora de electrones final. El catabolismo oxidativo requiere de la presencia de un oxidante de la materia orgánica, el cual no se encuentra en las aguas residuales, por lo tanto, debe ser suministrado.

Respecto a lo estudiado, el objetivo principal de la digestión ácida, es la descomposición de la materia orgánica, hasta formar una pasta homogénea de color negro mate. (Se destruyen los componentes orgánicos parcialmente y se liberan los elementos minerales).

### 2.2.3. Neutralización de riles

[5] Un sinnúmero de descargas industriales ocurren en condiciones de acidez o alcalinidad que son incompatibles con las normas de descarga o con los procesos biológicos o físico químicos posteriores. Este proceso se lleva a cabo mezclando efluentes ácidos y alcalinos en un equalizador y se dispone de alguna capacidad de retención de cargas fuertes en ácido o álcali. Si la actividad industrial del caso genera desechos tanto ácidos como alcalinos, se deben utilizar tanto la acidez como la alcalinidad excedentes para producir un efluente neutro.

[7] Por otra parte un pH de menos de 5 puede causar corrosión en la estructura del sistema colector y un pH de 11-12 o más puede causar quemaduras a los trabajadores de la planta de tratamiento que entren en contacto con las aguas residuales. Otra razón por la que se debe mantener el pH bajo control es para mejorar lo más posible los resultados de la aplicación del proceso.

El sistema de control del pH es generalmente uno de los siguientes tres tipos: continuo sin control, controlado por tandas y continuo controlado. El más simple de todos es un sistema continuo sin control, que consiste en hacer pasar una corriente de aguas residuales ácidas sobre un lecho de trozos de piedra caliza.

Otro método es tratar las aguas residuales por lotes. En este caso se mide el pH, se añade ácido o base y se vuelve a medir el pH hasta que se logra el nivel deseado y se puede descargar el agua al alcantarillado o someterla a cualquier otro tipo de tratamiento adicional que sea necesario.

El método más avanzado para controlar el pH es un sistema continuo con telesensores que miden el pH y añaden los productos químicos necesarios. En este método el sensor mide el pH y envía mensajes a un sistema de bombeo para que añada el producto químico neutralizador que corresponda y luego se mezcla el agua residual para asegurarse que la distribución del neutralizador sea homogénea.

Al seleccionar el compuesto químico neutralizador hay que tener en cuenta varios factores, entre ellos:

- El estado del compuesto químico (sólido o líquido).
- La toxicidad.
- La facilidad de uso.
- Los subproductos que se produzcan en la reacción.
- La rapidez de la reacción.
- La corrosividad.
- El costo de los productos químicos.
- Si pueden obtenerse fácilmente.

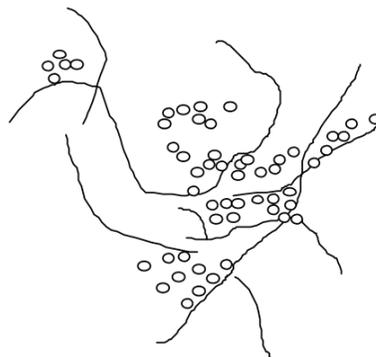
- Las concentraciones necesarias de los mismos.
- La producción de lodo residual, así como la facilidad de deshidratación y eliminación del mismo.

#### **2.2.4. Proceso de neutralización y floculación usando $\text{Ca}(\text{OH})_2$**

[8] Las prácticas neutralización y floculación son tratamientos previos esenciales para muchos sistemas de purificación de agua. [9] En lo que concierne al proceso de floculación, es importante tener claro las diferencias entre el concepto de coagulación y floculación. La confusión proviene del hecho de que frecuentemente ambas operaciones se producen de manera simultánea. Para aclarar ideas se define coagulación como la desestabilización de la suspensión coloidal, mientras que la floculación se limita a los fenómenos de transporte de las partículas coaguladas para provocar colisiones entre ellas promoviendo su aglomeración y sedimentación por gravedad. Las especies coloidales halladas en aguas superficiales y residuales incluyen arcillas, sílice, hierro, metales pesados, color ó sólidos orgánicos.

[10] La cal es el producto químico principal y de más bajo costo empleado en el tratamiento de aguas, las dos formas comerciales disponibles son Cal viva ( $\text{CaO}$ ) y cal hidratada (conocida también como: cal apagada, hidróxido de cal, representada por la siguiente fórmula:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). En el proceso experimental se utilizó cal hidratada debido a que tiene un costo de mercado menor al del óxido de calcio.

[8] La cal se usa principalmente para eliminar las sales minerales de calcio y magnesio. Además, elimina toxinas perjudiciales como el radón y el arsénico. En la figura 1 se puede observar el comportamiento del agente floculante.



**Figura 1. Aglomeración de partículas coloidales**

Los usos medioambientales de la cal están vinculados al tratamiento de agua potable e industrial, tratamiento de las aguas del alcantarillado y sus lodos, recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos y solventes químicos, desulfuración de los gases de la combustión, tratamiento de los residuos sólidos y sus lixiviados e indirectamente la estabilización o transformación de suelos inestables y expansivos en suelos aptos para servir de base de pavimentos. Su uso e importancia ambiental está creciendo rápidamente, pues constituye una respuesta efectiva a la necesidad de encontrar soluciones buenas y de bajo costo para los problemas medioambientales señalados.

La cal, a muy bajo costo permite aumentar el pH, precipitar los metales pesados y convertir los peligrosos lodos de las aguas del alcantarillado, en un valioso producto para la agricultura. Sus aplicaciones más sobresalientes en el campo sanitario y ambiental incluyen:

Producción de agua potable: Una buena parte de la cal producida en el mundo se destina a mejorar la calidad del agua que consumen las personas y utilizan las industrias. En este caso se emplea para suavizar, purificar, eliminar turbiedad, neutralizar la acidez y remoción de sílice y otras impurezas.

La cal es usada para neutralizar las aguas ácidas y en consecuencia evitar la corrosión de los conductos y tuberías. Las aguas corrosivas contienen excesivas cantidades de dióxido de carbono (ácido carbónico) el cual es atrapado por la cal para formar carbonato de calcio.

A continuación se realizará una descripción de los tratamientos terciarios, es decir, aquellos que están involucrados en la parte final del proceso para que este tenga las propiedades deseadas al lugar de descarga.

## **2.2.5. Adsorción con carbón activo**

[11] La adsorción es un proceso donde un sólido se utiliza para quitar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activo es el sólido. El carbón activo se produce específicamente para alcanzar una superficie interna muy grande (entre 500 - 1500 m<sup>2</sup>/g). El carbón activo viene en dos variaciones: carbón activado en polvo (PAC) y carbón activado granular (GAC). La versión de GAC se utiliza sobre todo en el tratamiento de aguas, puede fijar las siguientes sustancias solubles por adsorción:

- Adsorción de sustancias no polares como: aceite mineral, poli-hidrocarburos aromáticos, (cloruro) fenol y adsorción de sustancias halogenadas: I, Br, Cl, H y F
- Olor
- Levaduras
- Varios productos de fermentación

### Descripción del proceso:

El agua es bombeada dentro de una columna que contiene el carbón activo, esta agua deja la columna a través de un sistema de drenaje. La actividad del carbón activo de la columna depende de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias. El agua pasa a través de la columna constantemente, con lo que produce una acumulación de sustancias en el filtro. Por esa razón el filtro necesita ser sustituido periódicamente. Un filtro usado se puede regenerar de diversas maneras, el carbón granular puede ser regenerado fácilmente oxidando la materia orgánica. La eficacia del carbón activo disminuye en un 5- 10%. [12] Una parte pequeña del carbón activo se destruye durante el proceso de la regeneración y debe ser sustituida.

### Descripción de la adsorción:

Las moléculas a partir de la fase del gas o del líquido serán unidas de una manera física a una superficie, en este caso la superficie es de carbón activo. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

Macro transporte: El movimiento del material orgánico a través del sistema del macro-poros del carbón activo (macro-poros > 50nm).

Micro transporte: El movimiento del material orgánico a través del sistema del micro-poros del carbón activo (microporo < 2nm; meso-poro 2-50nm).

Absorción: La adhesión física del material orgánico en la superficie del carbón activo en los meso-poros y micro-poros del carbón activo.

## **2.3. Producción de gases tóxicos en el proceso**

Es importante considerar que en la mezcla de residuos líquidos peligrosos se generan variadas reacciones químicas, lo que implica la obtención de productos gaseosos de alta toxicidad los cuales serán descritos a continuación.

[13] Cloruro de hidrógeno: HCl, a temperatura ambiente es un gas ligeramente amarillo, corrosivo, no inflamable, más pesado que el aire, de olor fuertemente irritante. Cuando se expone al aire el HCl forma vapores corrosivos densos de color blanco.

Densidad del gas (1,013 bar en el punto de ebullición): 2,1 [kg/m<sup>3</sup>]

Dióxido de azufre:  $\text{SO}_2$ , es un gas incoloro con un característico olor asfixiante. En agua se disuelve formando una disolución ácida. (En estado líquido es un disolvente). En presencia de cloro produce  $[\text{SO}_2\text{Cl}_2]$ . El  $\text{SO}_2$  es el principal causante de la lluvia ácida, ya que en la atmósfera es transformado en ácido sulfúrico.

Densidad del gas (1,013 bar en el punto de ebullición):  $3,0571 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Óxido nítrico y Dióxido de nitrógeno:  $\text{NO}_x$  y  $\text{NO}_2$  respectivamente, son los únicos óxidos de nitrógeno en la atmósfera e introducidos por el hombre. Se produce por las altas temperaturas alcanzadas en las combustiones. Provocan la combinación directa del oxígeno y el nitrógeno del aire para producir óxido nítrico (NO) y este luego se oxida parcialmente a  $\text{NO}_2$ .

Densidad del gas (1,013 bar en el punto de ebullición):  $3,027 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Fluoruro de hidrógeno:  $(\text{HF})_x$ , compuesto químico altamente peligroso formado por hidrógeno y flúor. No utilizar material de vidrio, debido a que este gas puede corroerlo, por esto se manipula bajo fríos extremos utilizando material plástico.

Densidad del Gas (1 bar y  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $77 \text{ }^\circ\text{F}$ )):  $0,83 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Bromuro de hidrógeno:  $\text{HBr}$ , es un gas que en disolución acuosa es un ácido fuerte, reacciona violentamente con gases y es corrosivo. Es más denso que el aire, tiene un olor picante muy parecido al del ácido clorhídrico.

Densidad del gas (1,013 bar en el punto de ebullición):  $[4,88 \text{ kg/m}^3]$

Sulfuro de hidrógeno:  $\text{H}_2\text{S}$ , es un gas más pesado que el aire, es inflamable, incoloro, tóxico, su olor es el de materia orgánica en descomposición como el de huevos podridos. (En solución acuosa y bases fuertes genera sales: los sulfuros).

Densidad del gas (1,013 bar en el punto de ebullición):  $1,997 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Cianuro de hidrógeno:  $\text{HCN}$ , es una sustancia química sumamente inflamable y reactiva que presenta un grave peligro de incendio y explosión. Tiene un ligero olor a almendras amargas. Puede causar mareo, dolor de cabeza, latidos fuertes, dificultad respiratoria, náusea, entre otros. Se genera por la reacción de un cianuro  $\text{CN}^-$  (compuesto orgánico) y un ácido fuerte.

Densidad de vapor (a  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ ):  $0,947 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Yoduro de hidrógeno: HI, se encuentra como un gas incoloro bajo condiciones normales. A las soluciones acuosas producidas con yoduro de hidrógeno se le conoce como ácido yodhídrico, que es un ácido fuerte. El HI se someterá a la oxidación si entra en contacto con el oxígeno gaseoso del aire.

Densidad del gas (1,013 bar en el punto de ebullición): 5,79 [kg/m<sup>3</sup>]

Amoniaco: NH<sub>3</sub>, a temperatura ambiente es un gas incoloro de olor muy penetrante y nauseabundo. Se produce naturalmente por descomposición de la materia orgánica. No se debe mezclar amoniaco con hipoclorito de sodio, ya que reaccionaría generando un gas irritante y muy tóxico.

Densidad del gas (1,013 bar en el punto de ebullición): 0,889 [kg/m<sup>3</sup>]

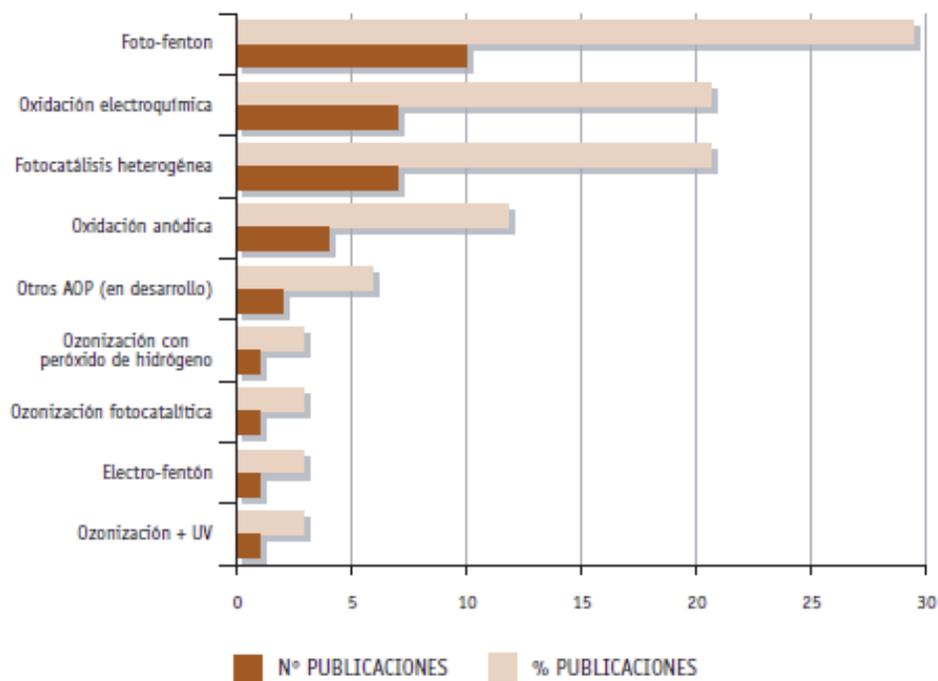
## **2.4. Aplicación del proceso Fenton y Electro-Fenton**

[14] Los procesos involucrados en el tratamiento de riles que se utilizan en la actualidad son: tratamiento biológico, por adsorción con carbón activo u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales (oxidación térmica, cloración, ozonización, permanganato de potasio, etc.). Sin embargo en algunos casos estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso ulterior del efluente tratado. En estos casos y cada vez más crecientemente, se está recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas tecnologías o procesos avanzados de oxidación (TAOs, PAOs), muy poco aplicados y, peor aún, menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina.

La reacción Fenton es uno de los procesos (PAOs) más utilizado para purificar aguas riles, siendo la aplicación del método electroquímico en la reacción Fenton un proceso estudiado en los últimos tiempos debido a que aumenta la eficiencia de degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua.

Debido a la existencia de incertidumbre económica respecto a la aplicación de este proceso se evaluó económicamente la factibilidad de reemplazar un proceso Fenton por un Electro-Fenton.

[15] Los artículos científicos sobre procesos avanzados de oxidación, como se puede observar en la figura 2, muestran que la investigación en este tipo de procesos se centra principalmente en las siguientes técnicas: Foto-Fenton (29,41%), oxidación electroquímica (20,59%), fotocatalisis heterogénea (20,59%) y oxidación anódica (11,76%).



**Figura 2. Artículos científicos sobre procesos avanzados de oxidación**

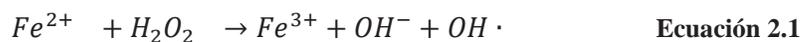
Nota. Fuente: Rodríguez, Fernández-Alba, Antonio. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales

En consiguiente se realizará una descripción de los procesos Fenton y Electro-Fenton, respectivamente:

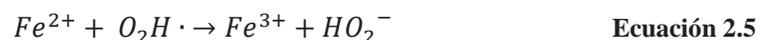
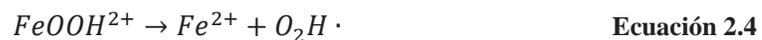
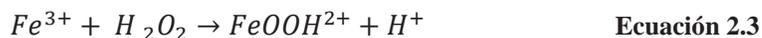
### 2.4.1. Proceso Fenton

[14] Se ha evidenciado que la reacción Fenton es uno de los procesos más avanzado de oxidación (AOPs) para el tratamiento de aguas riles, es decir, que tiene la capacidad de degradar la mayor cantidad de materia orgánica presente en éste. Este proceso genera radicales hidroxilos (HO•) los cuales son oxidantes potentes no selectivos, por lo tanto, pueden oxidar y mineralizar casi todos los compuestos orgánicos en CO<sub>2</sub> e iones inorgánicos. [16] Básicamente, la técnica es un proceso de oxidación avanzada que consiste en la descomposición catalítica de agua oxigenada en presencia de sales de hierro en un medio ácido. Los radicales generados en la descomposición, son los encargados de degradar los contaminantes presentes en las aguas residuales.

[17] La reacción de Fenton se describe en la siguiente ecuación 2.1:



En un medio ácido, ésta compleja reacción serial genera los radicales mostrados en las siguientes ecuaciones:



Respecto a las ecuaciones descritas, en el proceso Fenton, se agrega una dosis de ión ferroso ( $Fe^{2+}$ ), el cual se obtiene del compuesto  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , para catalizar el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), lo cual genera lodos de hidróxido férrico que requieren un proceso de separación adicional y su disposición.

[18] Según el estudio bibliográfico realizado, la dosis óptima de Fenton en un tratamiento de riles generados por una industria minera se determina según la concentración y composición inicial de la carga orgánica que puede oxidarse (DQO), la cual se relaciona con la dosis y con la relación másica  $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$  y  $[DQO]/[H_2O_2]$  con las que se alcanza un mayor grado de oxidación y, por tanto, optimizan el proceso. Esta relación Fenton  $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$  varía de 0,016 a 1,67, con valor medio de 0,63, y la relación  $[DQO]/[H_2O_2]$  varía de 0,24 a 38,33, con valor medio de 10,83.

[19] De acuerdo a lo estudiado, para evitar las desventajas de la oxidación Fenton, tales como el riesgo en el transporte de  $H_2O_2$ , una pérdida de actividad reactiva y la producción de lodos, se desarrolló un proceso modificado, llamado método Electro-Fenton. Este método tiene la ventaja de permitir un mejor control de la producción de radicales hidroxilos, el  $Fe^{3+}$  soluble puede ser catódicamente reducido a  $Fe^{2+}$ , lo cual se conoce como catálisis electroquímica, por lo tanto, la rápida generación de  $Fe^{2+}$  acelera la producción de  $OH \cdot$ , de acuerdo a la siguiente ecuación 2.9:



## 2.4.2. Proceso Electro-Fenton

[17] El uso de técnicas electroquímicas para el tratamiento de contaminantes orgánicos contenidos en las aguas residuales ha recibido una gran atención en los años recientes. Se cree que los métodos electroquímicos son más amistosos ambientalmente que otros métodos químicos usados en el tratamiento de agua residual, también se ha probado que las técnicas electroquímicas representan una manera eficiente de remover los contaminantes orgánicos.

El proceso Electro-Fenton es la aplicación del método electroquímico en el proceso Fenton, se puede efectuar de 3 maneras. La primera aproximación consiste en aplicar iones férricos en tal manera que el peróxido de hidrógeno y el ion ferroso se generen al mismo tiempo en el cátodo. La segunda aproximación consiste en aplicar peróxido de hidrogeno y utilizar un ánodo de hierro como fuente de ion ferroso o para electro generar ion ferroso. La tercera aproximación consiste en electro generar ion ferroso y peróxido de hidrogeno sacrificando ánodo y cátodo respectivamente.

[14] La aplicación de corriente eléctrica entre dos electrodos adecuados en agua produce reacciones químicas primarias, con la generación de HO•, que oxida luego la materia orgánica, como se puede observar en las siguientes ecuaciones 2.9.1 y 2.9.2, las cuales representan la reacción de oxidación anódica y la reacción de reducción catódica respectivamente:



Luego la eficiencia del sistema es mejorada agregando el ion ferroso como se describió anteriormente. El método que se utilizará durante el proceso experimental en la presente tesis es llevando a cabo el sacrificio de un ánodo de Fe, que provee cantidades estequiométricas de Fe para la reacción Fenton, también conocido como proceso de peroxicoagulación.

En la siguiente tabla 2 se pueden observar las ventajas de la aplicación de las tecnologías avanzadas de oxidación en el tratamiento de residuos químicos líquidos.

**Tabla 2. Ventajas de los procesos avanzados de oxidación**

<b>Ventajas de las Tecnologías avanzadas de oxidación</b>
➤ No sólo cambian de fase al contaminante (como ocurre en el arrastre con aire o en el tratamiento con carbón activado), sino que lo transforman químicamente.
➤ Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
➤ Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
➤ Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, ppb).
➤ No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
➤ Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pre-tratamientos alternativos, como la desinfección.
➤ Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
➤ En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).
➤ Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables luego por métodos más económicos como el tratamiento biológico.
➤ Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.
➤ Usualmente no generan barros que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.

**Nota.** Fuente: Rodríguez, Fernández-Alba, Antonio. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales

## **2.5. Métodos de análisis**

[20] Se realizan análisis tanto cualitativos como cuantitativos de sustancias químicas presentes en las aguas. Las metodologías para el análisis de parámetros químicos orgánicos e inorgánicos se determinan a través de:

Equipo que mide el DQO de las muestras: mide el nivel general de contaminación orgánica en aguas residuales. Este nivel se determina midiendo la cantidad equivalente de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en la muestra.

Se utilizan ampollas reactivas a prueba de derrames, que contienen una solución pre dosificada de ácido sulfúrico y potasio dicromato.

El analista simplemente debe quitar el tapón roscado, se añade la muestra y se vuelve a tapar la ampolla. Esta ampolla se calienta 2 horas a 150 °C en un bloque digestor. Los resultados se obtienen usando cualquier fotómetro que acepte cubetas de 16 mm de diámetro (kit que mide el DQO de las muestras, como se observa en la figura 3).



**Figura 3. Equipo para medir la DQO**

Papel pH: El Papel tornasol o papel pH es utilizado para medir la concentración de iones hidrógenos contenido en una sustancia o disolución mediante la escala de pH, la cual es clasificada en distintos colores y tipos. Como resultado se podrá obtener una noción sobre el nivel de pH que contiene una determinada sustancia o disoluciones. El cambio de color de un indicador es apreciable cuando la concentración de la forma ácida o de la forma básica es superior o igual a 10 veces la concentración de la forma básica o la forma ácida respectivamente.

Espectrofotómetro: es un instrumento usado en el análisis químico que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones y la concentración o reacciones químicas que se miden en una muestra. Se puede observar en la figura 4 el espectrofotómetro similar al utilizado.



**Figura 4. Espectrofotómetro para medir la absorbancia de las muestras**

Espectroscopia de Absorción atómica: la absorción atómica es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente algunos de los elementos del sistema periódico. Sus campos de aplicación son, por lo tanto, muy diversos. Este método se puede aplicar para la determinación de ciertos metales tales como: antimonio, cadmio, calcio, cesio, cromo, cobalto, oro, plomo, níquel, entre otros. La técnica consiste en la medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular, el cual se puede observar en la figura 5.



**Figura 5. Espectroscopia de absorción atómica**

Posterior al estudio bibliográfico de los procesos de precipitación alcalina, digestión ácida, neutralización, floculación, adsorción con carbón activo, Electro-Fenton y el estudio de los métodos de análisis de los parámetros, tales como, demanda química de oxígeno (DQO), pH, absorción atómica, entre otros. Se procederá a resumir las normativas chilenas más importantes que tienen relación directa con los parámetros que se deben cumplir para poder tratar los riles generados por la universidad y en consecuencia analizar la factibilidad de instalar una planta de riles para el centro educacional.

## **CAPITULO III RESUMEN DE LAS NORMATIVAS CHILENAS**

En el presente capítulo, se estudiarán las normativas chilenas para cumplir con los parámetros exigidos y las normativas chilenas relacionadas con instalar una planta de tratamientos de riles en PUCV, campus Curauma.

### **3.1. Normas relacionadas con el manejo de riles**

[21] En la Pagina Oficial del SISS (Superintendencia de Servicios Sanitarios) se encuentra en resumen las normativas que deben ser cumplidas en el tratamiento de riles. Las cuales se presentan a continuación.

#### Autocontrol, métodos de análisis físico químico

Las empresas que cuenten con autorización para usar sistemas de depuración y neutralización de los riles, es necesario que sus laboratorios apliquen las normas técnicas correspondientes, como por ejemplo la Norma Nch 2313/5 Of. 95 para DBO5 y la Nch 2313/8 Of. 97 para el sulfato.

De no poder implementar éste procedimiento ha de recurrirse a un laboratorio externo, que cuente con las metodologías antes descritas. (ORD. N° 558/98).

#### Criterios para el análisis de estudios de impacto ambiental de un relleno sanitario

La SISS requiere se precisen el caudal aproximado y caracterización físico-química de los residuos líquidos industriales, líquidos percolados, la eficiencia de remoción de los principales parámetros contaminantes en el sistema de tratamiento propuesto. También, se debe indicar la norma a cumplir en la descarga de los efluentes.

Además, el titular del proyecto deberá proponer un programa de monitoreo que ofrezca la seguridad de evaluar la eventual contaminación de la napa subterránea en el proyecto. (ORD. N° 828/98).

### Factibilidad de alcantarillado

Instructivo de procedimiento para el otorgamiento de certificados de factibilidad de alcantarillado a establecimientos industriales. (ORD. N° 671/93).

### Guía para elaboración de estudios de riles

Aprobación de guía para la elaboración de estudios de sistemas de neutralización y depuración de los riles y sus anexos. (RES. EX. SISS N° 1239/98).

### Sistema de control de riles

[22] Se debe cumplir con el Decreto 609/98, que establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado. En la tabla 3 y 4 se puede observar el límite máximo permitido de contaminantes que puede tener el efluente. (Anexos).

**Tabla 3. Límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectúan al alcantarillado**

Parámetros	Unidad	Expresión	Límite máximo permitido
Aceites y Grasas	[mg/L]	A y G	150
Arsénico	[mg/L]	As	0,5
Cadmio	[mg/L]	Cd	0,5
Cianuro	[mg/L]	CN <sup>-</sup>	1
Cobre	[mg/L]	Cu	3
Cromo Total	[mg/L]	Cr	10
Cromo Hexavalente	[mg/L]	Cr <sup>+6</sup>	0,5
DBO <sub>5</sub>	[mg/L]	DBO <sub>5</sub>	250
Fósforo	[mg/L]	P	10 - 45
Hidrocarburos totales	[mg/L]	HC	20
Mercurio	[mg/L]	Hg	0,02
Níquel	[mg/L]	Ni	4
Nitrógeno Amoniacal	[mg/L]	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	80
pH	Unidad	pH	5,5 – 9,0
Plomo	[mg/L]	Pb	1

**Tabla 4. Continuación de los límites máximos permitidos**

Poder Espumógeno	[mm]	PE	7
Sólidos Sedimentables	[ml/L] 1h	S.D.	20
Sólidos Suspendidos Totales	[mg/L]	S.S.	300
Sulfatos (disueltos)	[mg/L]	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	1000
Sulfuros	[mg/L]	S <sup>-2</sup>	5
Temperatura	° C	T°	35
Zinc	[mg/L]	Zn	5

**Nota.** Fuente: Chile, Decreto Norma; 609/98. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado

#### Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos, decreto 148

[21] Este reglamento establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, re uso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos.

### **3.2. Normas relacionadas con la instalación de la planta**

A continuación se entrega un resumen de las normativas chilenas que deben ser ejecutadas en el proyecto de instalar una planta de tratamientos de riles en el Campus de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, ubicado en Curauma.

#### Ley 19.300/1994 del MINSEGPRES, sobre bases generales del medio ambiente

La ley numero 19.300 y el reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental, establecen los tipos de proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases y por lo tanto, debieran ser sometidas al sistema de evaluación de impacto ambiental.

El proyecto que aquí se presenta es aplicable al artículo 3 letra O “Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos”. Por lo que será necesario realizar un estudio de impacto ambiental.

D.S. 95/2001 del MINSEGPRES, reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental

Establece disposiciones por las cuales se rige el SEIA. Por lo que el Proyecto debe ser sometido al SEIA bajo la modalidad de DIA (declaración de impacto ambiental).

D.S. número 594, condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo

Establece normas sobre condiciones básicas en los lugares de trabajo: provisión de agua potable, disposición de residuos sólidos y líquidos. Exposición a diferentes agentes, entre otros.

D.S. número 144/61 del Ministerio de Salud Pública

Establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza. Por lo que en el proyecto se consideró en la construcción y operación del sistema de tratamiento, medidas de mitigación de emanaciones atmosféricas, las cuales son mínimas.

Las normativas chilenas descritas son de gran relevancia, debido a que si el proceso establecido en el desarrollo experimental, no cumplen con los límites requeridos, implicaría inmediatamente que no es factible proponer el diseño de una planta de riles en la PUCV, por lo tanto, es importante revisar detalladamente éstas normativas y compararlas con los resultados que se obtendrán en las experiencias a nivel de laboratorio.

# **CAPITULO IV CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE RILES**

En el siguiente capítulo se realizará una caracterización de los riles generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y un estudio de los requerimientos de retiros de la Universidad.

En la universidad se encuentran varias escuelas, las cuales generan residuos líquidos peligrosos (riles), tales como:

Instituto de Química (Facultad de Ciencias), Escuela de Ingeniería Bioquímica, Escuela de Agronomía, Escuela de Ingeniería en Alimentos, Escuela de Ingeniería en Construcción, Escuela de Ingeniería Mecánica y la Escuela de Ingeniería Química.

[23] Las actividades de investigación, especialmente aquellas realizadas en laboratorios, generan residuos peligrosos, los cuales son gestionados mediante el plan de manejo de estos residuos por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Por lo que en el año 2013 se construyeron dos nuevas bodegas de sustancias y residuos peligrosos en las inmediaciones del campus Curauma, lo cual se realizó con la asesoría de la empresa Brisa, a fin de que cumpliera con los más altos estándares de almacenamiento y retiro de sustancias. De esta manera se centralizó el acopio de los residuos de todas las sedes de Valparaíso en dicho recinto, contando con nuevo personal capacitado y vehículo para esta tarea.

## **4.1. Caracterización de los riles**

[24] La importancia de caracterizar los residuos químicos líquidos recae en que las cantidades y su tipología afecta en la aplicación de los tratamientos primarios y terciarios para disminuir los contaminantes presentes en el ril. A modo de ejemplo, los residuos líquidos químicos generados por una industria minera a una industria agrícola, difieren, ya que, las concentraciones y variaciones de materiales pueden cambiar considerablemente, dependiendo de la clase de sustancias y de sus concentraciones, por lo tanto, los tratamientos empleados en los residuos líquidos varían según el ril en cuestión.

A continuación se realizará una descripción detallada de los residuos líquidos industriales generados por la Universidad.

Los residuos líquidos peligrosos generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso se clasifican en:

#### **4.1.1. Residuos líquidos halogenados**

[25] Son sustancias químicas orgánicas que contienen uno ó varios átomos de un elemento halógeno (generalmente cloro, aunque existen compuestos formados con bromo y yodo). Pueden ser sustancias simples y volátiles como es el caso del triclorometano (cloroformo), ó moléculas orgánicas complejas como las dioxinas y los furanos, que pueden presentar gran variedad de propiedades físicas.

[26] Se entiende también, por tales, los productos líquidos orgánicos que contienen más del 2% de algún halógeno. Se trata de productos muy tóxicos e irritantes y, en algunos casos cancerígenos. Se incluyen en este grupo también las mezclas de disolventes halogenados y no halogenados, siempre que el contenido en halógenos de la mezcla sea superior al 2%.

[27] Ejemplos: cloruro de metileno, bromoformo, fenol, alcohol clorhídrico, hidrato de coral, naranja de acridina, azul alcian, azul metileno, azul toluidina, fucsina básica, cloroformo, tricloroetileno, pironina G, rojo neutro, safranina, verde de metilo, violeta de cresilo, violeta de genciana, violeta de metilo, entre otros.

Se consultó a las encargadas del laboratorio 1 de la Escuela de Ingeniería Química los compuestos que son vertidos regularmente en el contenedor de los residuos líquidos halogenados. Entre estos se encuentran: cloro, yodo, bromo, entre otros.

#### **4.1.2. Residuos líquidos no halogenados**

[26] Se clasifican aquí los líquidos orgánicos inflamables que contengan menos de un 2% en halógenos. Los disolventes no halogenados también pueden ser peligrosos, generalmente son (altamente) inflamables. Algunos de ellos son nocivos o tóxicos. [28] Si tienen tendencia a afectar las condiciones físicas, químicas o biológicas del agua (lo que suele ser el caso para los hidrocarburos aromáticos y diversos éteres) se clasifican como peligrosos para el agua y no deben arrojarse por el sumidero, lo mismo que ocurre con los disolventes halogenados.

Es importante, dentro de este grupo, evitar mezclas de disolventes que sean inmiscibles ya que la aparición de fases diferentes dificulta el tratamiento posterior.

[27] Ejemplos: los alcoholes, aldehídos, amidas, cetonas, ésteres, glicoles, hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos, nitrilos, acetato de etilo, acetato de plomo, etanol, metanol, benceno,

butanol, éter, fenol, eucaliptol, formaldehído, glicerina, 2-propanol, timol, resorcina, xilol, naranja G, azul anilina, carmín, formol, entre otros.

Se consultó a las encargadas del laboratorio 1 de la Escuela de Ingeniería Química los compuestos que son vertidos regularmente en el contenedor de los residuos líquidos no halogenados. Entre estos se encuentran: etanol, metanol, acetona, butanol, tolueno, benceno, entre otros.

### **4.1.3. Residuos líquidos ácidos**

[26] Corresponden a este grupo los ácidos inorgánicos y sus soluciones acuosas concentradas (más del 10% en volumen). Debe tenerse en cuenta que su mezcla, en función de la composición y la concentración, puede producir alguna reacción química peligrosa con desprendimiento de gases tóxicos e incremento de temperatura. Para evitar este riesgo, antes de hacer mezclas de ácidos concentrados en un mismo envase, debe realizarse una prueba con pequeñas cantidades y, si no se observa reacción alguna, llevar a cabo la mezcla.

[27] Ejemplos: Acetato sódico anhidro, ácido acético, ácido benzoico, ácido cítrico, ácido etilendiamino, ácido fórmico, ácido fosfomolibdico, ácido monocloroacético, ácido oxálico, ácido píttrico, ácido rubeánico, ácido tricloroacético, cromotropo, ácido clorhídrico, ácido fosfotúngstico, ácido nítrico, ácido periódico, ácido sulfúrico, entre otros.

Se consultó a las encargadas del laboratorio 1 de la Escuela de Ingeniería Química los compuestos que son vertidos regularmente en el contenedor de los residuos líquidos ácidos. Entre estos se encuentran: ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido orto-fosfórico, ácido perclórico, entre otros.

### **4.1.4. Residuos líquidos alcalinos o básicos**

[26] Son soluciones inorgánicas básicas de gran poder contaminante por sus características tóxicas y corrosivas.

[27] Ejemplos: hidróxido de aluminio, hidróxido amónico, hidróxido potásico, hidróxido sódico, entre otros.

Se consultó a las encargadas del laboratorio 1 de la Escuela de Ingeniería Química los compuestos que son vertidos regularmente en el contenedor de los residuos líquidos alcalinos. Entre estos se encuentran: soluciones de: hidróxido de amonio, hidróxido de potasio, carbonato de calcio, carbonato de sodio, sulfato de sodio, entre otros.

#### **4.1.5. Residuos líquidos que contienen metales pesados**

[29] Los metales pesados normalmente aparecen en el agua superficial procedentes de las actividades comerciales e industriales y tienen que eliminarse si el agua residual se va a reutilizar.

Los metales pesados son elementos metálicos con gran peso atómico. Son elementos que tienen pesos atómicos entre 63,546 y 299,590 con una gravedad específica mayor a 4,011.

Todos los metales pesados existen en las aguas superficiales en forma coloidal, de partículas y en fases disueltas, pero las concentraciones en disolución son bajas generalmente. El metal en partículas y coloidal puede encontrarse en 1) hidróxidos, óxidos, silicatos o sulfuros, o 2) adsorbidos en la arcilla, en el síliceo en la materia orgánica. Las formas solubles generalmente son iones, quelatos o complejos organometálicos no ionizables. La solubilidad de trazas de metales en las aguas superficiales está controlado predominantemente por el pH, por el tipo de concentración de los ligandos en los cuales el metal puede absorberse y por el estado de oxidación de los componentes minerales, el ambiente redox del sistema.

La toxicidad de un metal depende de su vía de administración y del compuesto químico al que está ligado. La combinación de un metal con un compuesto orgánico puede aumentar o disminuir sus efectos tóxicos sobre las células. En cambio, la combinación de un metal con el azufre, en forma de sulfuro, da lugar a un compuesto menos tóxico que el hidróxido u óxido correspondiente, debido a que el sulfuro es menos soluble en los humores corporales que el óxido.

Ejemplos: mercurio, cromo, cadmio, arsénico, plomo, cobre, zinc y níquel. A bajas concentraciones pueden afectar a los seres vivos y tienden acumularse en la cadena alimentaria.

Se consultó a las encargadas del laboratorio 1 de la Escuela de Ingeniería Química los compuestos que son vertidos regularmente en el contenedor de los residuos líquidos que contienen metales pesados. Entre estos se encuentran: cromo, plata, hierro, cobre, arsénico, oro, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, zinc, cadmio, selenio, entre otros.

## 4.2. Cuantificación de los riles

[23] Las cantidades de residuos líquidos peligrosos generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso anualmente, fueron consultados al prevencionista de riesgos de la unidad académica. Estos datos fueron corroborados en el reporte de sostenibilidad del año 2013 y 2012, donde se especifican las cantidades de residuos líquidos halogenados, no halogenados, ácidos, alcalinos y los que contienen metales pesados, en toneladas anuales como se puede observar en la siguiente tabla 5.

**Tabla 5. Cantidad de riles generados por la PUCV**

<b>Ril</b>	<b>2013 [TON/AÑO]</b>	<b>2012 [TON/AÑO]</b>
<b>Soluciones Ácidas</b>	4,33	2,82
<b>Soluciones Alcalinas</b>	0,74	0,85
<b>Solventes no Halogenados</b>	1,1	1,85
<b>Solventes Halogenados</b>	1,16	0,21
<b>Metales Pesados</b>	0,57	0,83
<b>Total</b>	7,9	6,56

**Nota:** Fuente: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Reporte de Sostenibilidad. Coordinación General de Comunicación Institucional

Luego del estudio bibliográfico se procedió a realizar los trabajos experimentales para determinar un tratamiento óptimo que reduzca los contaminantes presentes en el ril generado por la PUCV y cumpla con los parámetros establecidos por la normativa chilena 609/98.

# CAPITULO V TRABAJO EXPERIMENTAL 1

En el laboratorio 4 de la Escuela de Ingeniería Química se llevo a cabo el desarrollo experimental 1, aplicando el proceso Fenton y el proceso Electro-Fenton a los riles generados por la escuela, con el fin de comparar la efectividad de estos procesos de oxidación avanzada.

## 5.1. Análisis de consumos en proceso Electro-Fenton

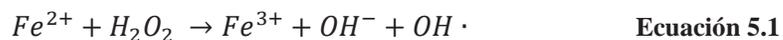
Caracterización del ril utilizado: el ril utilizado (12 litros) fue compuesto por reactivos antiguos, colorantes en polvo, compuestos fenólicos, benzaldehído y sustancias no halogenadas que se encuentran en el laboratorio con el fin de trabajar con un ril representativo de un laboratorio químico cualquiera.

De acuerdo a lo estudiado, se procedió a realizar un análisis de consumo del proceso Electro-Fenton para el tratamiento de riles. Por lo que la hipótesis planteada fue: “existen efectos sinérgicos en la aplicación del campo eléctrico y la reacción Fenton en las moléculas de contaminante que hacen que el proceso Electro-Fenton sea económicamente más rentable que el Fenton”. De acuerdo a los estudios bibliográficos realizados se establecieron los parámetros óptimos de reacción, tales como, la temperatura, tiempo de reacción y las dosificaciones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  que se deben agregar para realizar el trabajo experimental. Respecto a los resultados obtenidos, los parámetros a medir tanto en el proceso Fenton como Electro-Fenton, son: demanda química de oxígeno (DQO), color, turbidez del ril tratado, pH, absorbancia y cantidad de metales pesados.

### 5.1.1. Aplicación de la reacción Fenton

En el laboratorio 4 de la escuela de ingeniería química de desarrolló el procedimiento experimental para tratar el ril ya descrito, aplicando el proceso Fenton. Se utilizó un reactor de capacidad 20 [L] el cual cuenta para la agitación con una línea de descarga lo suficientemente fuerte como para potenciar la turbulencia dentro de este, y por otra parte cuenta con un serpentín para bajar la temperatura del ril cuando se le requiera. El reactor utilizado se puede observar en la figura 7.

Los reactivos utilizados fueron  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 15% p/v los cuales se solicitaron a las encargadas del laboratorio. El ión  $\text{Fe}^{2+}$  utilizado en la reacción Fenton, se obtiene del compuesto  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  el cual tiene un  $\text{PM} = 278,02$  [g/mol]. Debido a que la relación estequiométrica es de 1 mol de  $\text{Fe}^{2+}$  es a 1 mol de agente oxidante  $\text{H}_2\text{O}_2$ , como se puede visualizar en la ecuación 5.1 de la reacción Fenton, se calculó las cantidades de reactivos que se deben dosificar en el reactor.



Se obtuvo como resultado de que por cada 80 [ml] de  $H_2O_2$  al 15 % p/v es necesario agregar 10 [g] de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  en el método Fenton. Dado por datos bibliográficos el tiempo óptimo de reacción es de 2 horas, por lo tanto, se dosificó cada 20 [min] 12 [ml] de  $H_2O_2$  y a los 120 [min] se agregó 8 [ml] de  $H_2O_2$  en el reactor de capacidad de 20 [L] ubicado en el laboratorio 4 de la Escuela de Ingeniería Química. El  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  se dosificó paralelamente con el  $H_2O_2$ , cada 20 [min] una cantidad de 1,43 [g] a temperatura ambiente, obteniendo así 8 muestras para ser analizadas en el laboratorio.

### 5.1.2 Aplicación electroquímica de la reacción Fenton

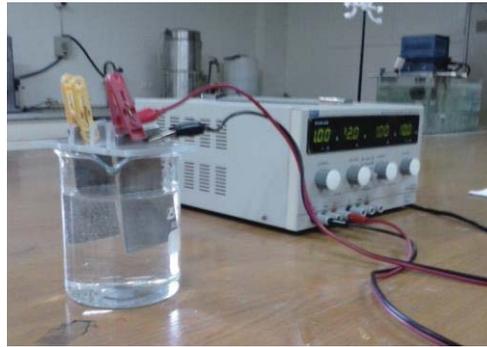
El proceso Electro-Fenton combina la reacción Fenton junto con un mecanismo de oxidación electroquímico. Este proceso posee un alto poder oxidante debido a la generación de radicales hidroxilo. El proceso experimental se llevó a cabo en el laboratorio 4 utilizando el mismo reactor ya descrito. El ríl a tratar tiene la misma caracterización que el utilizado en el proceso Fenton, ya que para poder comparar los resultados se debe trabajar bajo las mismas condiciones.

[30] Antes de aplicar el proceso Electro-Fenton se debe tener claridad del fenómeno o el mecanismo que ocurre durante el proceso. En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. En base a lo descrito, de acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de Electro-Fenton, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema.

Por lo tanto, previo a la aplicación del proceso Electro-Fenton es necesario calcular la eficiencia de corriente y en consecuencia determinar la cantidad de corriente real que se debe aplicar al sistema. Para poder determinar ésta eficiencia es necesario aplicar la ecuación 5.2 de la ley de Faraday para determinar la masa teórica aplicando 1 [A] en 2 [h]. Luego se debe calcular experimentalmente la masa real que se transfiere.

$$M_{teórica} = \frac{i \cdot t \cdot PM}{z \cdot F} \cdot n \quad \text{Ecuación 5.2}$$

En el laboratorio se procedió a calcular la masa real que se transfiere de una placa de acero a otra del mismo material, aplicando una intensidad de corriente de 1 [A] durante 2 hora, como se muestra en la figura 6.



**Figura 6. Desarrollo experimental para calcular la masa real**

La masa teórica obtenida fue de 1,04171 [g] y la masa real fue de 0,7032 [g], con estos valores numéricos se calculó la eficiencia de corriente utilizando la ecuación 5.3 siendo el resultado de 67,504%. Al obtener la eficiencia, se aplica nuevamente la ecuación 5.2 para calcular la corriente que se debe aplicar en el proceso Electro-Fenton, obteniendo como resultado 0,14 [A], un voltaje promedio de 26,5 [V] y a temperatura ambiente.

$$n = \frac{m_{real}}{m_{teórica}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Obteniendo estos resultados se llevo a cabo el proceso Electro-Fenton durante 2 [h], dosificando en el reactor de capacidad 20 [L] cada 20 [min], 12 [ml] de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y a los 120 [min] se agregó 8 [ml] de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. El ión ferroso se obtiene del ánodo que en este caso es una placa de acero, la cual junto a la otra placa de acero inoxidable (cátodo) se conectan a la fuente de poder.

En la figura 7 se puede observar el reactor utilizado en el desarrollo experimental y en la figura 8 las placas conectadas a la fuente de poder.



**Figura 7. Reactor de capacidad 20 [L]**



**Figura 8. Placas instaladas en la parte superior del reactor**

Durante el proceso Electro-Fenton la temperatura se mantuvo en un rango de [20-25] °C y el tiempo de reacción fue de 2 [h] al igual que en el proceso Fenton.

Finalmente se obtienen 8 muestras correspondientes al proceso Fenton y 8 muestras correspondientes al proceso Electro-Fenton, como se puede observar en la figura 9 y 10 respectivamente.



**Figura 9. Muestras obtenidas del proceso Fenton**



**Figura 10. Muestras obtenidas del proceso Electro-Fenton**

## **5.2. Resultados**

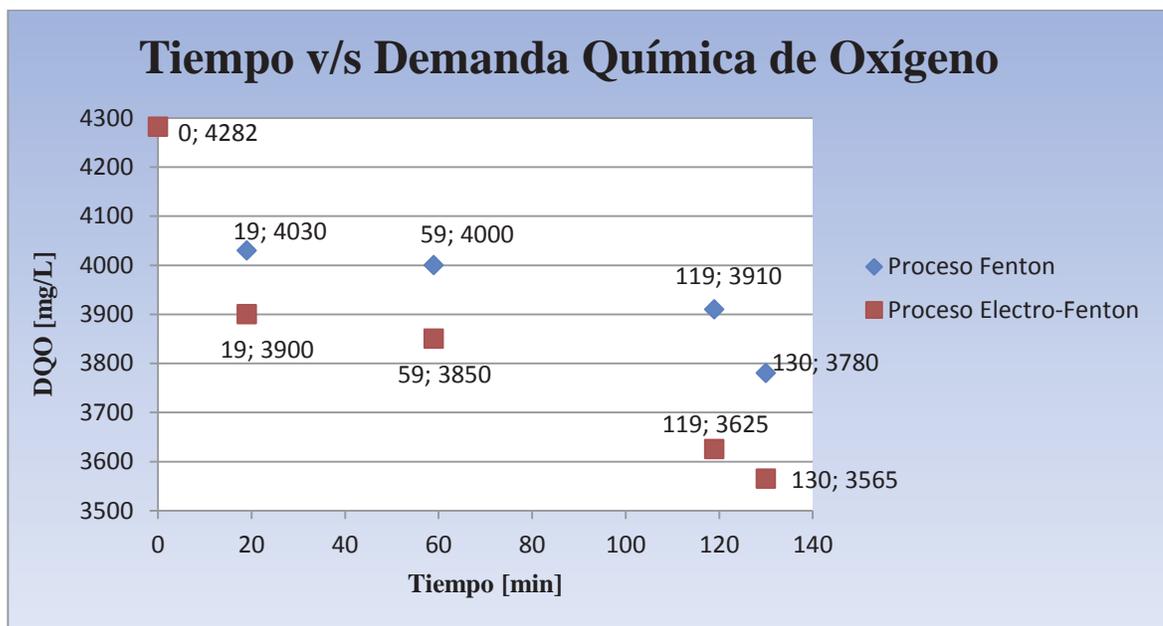
Los parámetros analizados en el laboratorio, según los equipos que se encuentran disponibles fueron: demanda química de oxígeno (DQO), medida de acidez o alcalinidad (pH) y absorbancia.

### **5.2.1. DQO de las muestras**

Es de gran importancia tener en consideración que la DQO varía en función de las características de los reactivos presentes en el ril, por lo que en el proceso experimental se utilizó el mismo residuo líquido, tanto para el proceso Fenton como para el proceso Electro-Fenton. Y así obtener resultados comparativos entre ambos procesos.

Probablemente los factores más influyentes en el proceso son la agitación en el estanque, debido a la gran cantidad de espuma que se genera y la temperatura del ril. Ambos tratables bajo un estricto control de la operación, ya que para la agitación se cuentan con una línea de descarga lo suficientemente fuerte como para potenciar la turbulencia dentro del estanque y por otra parte, se cuenta con un serpentín para bajar la temperatura de éste cuando se le requiera.

En la siguiente figura 11 se puede observar la degradación de la DQO en relación al tiempo de reacción, tanto para el proceso Fenton como para el proceso Electro-Fenton. Se puede apreciar claramente que la degradación de compuestos orgánicos presentes en el ril tratado es mayor cuando se aplica el método de oxidación avanzada a la reacción Fenton.



**Figura 11. Gráfico comparativo del DQO respecto al tiempo**

Posteriormente se calculó el DQO del ril representativo de residuos de laboratorios, caracterizado anteriormente, dando como resultado: 4282 [mg/L]. Luego de ser aplicado el proceso Fenton en el ril, se obtiene que el DQO de la muestra final es de 3780 [mg/L].

Respecto a la aplicación del proceso Electro-Fenton en el ril se obtiene que el DQO de la muestra final es de 3565 [mg/L]. Con estos datos se pueden calcular las eficiencias correspondientes a cada proceso, como se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6. Eficiencias de la DQO en el proceso Fenton y Electro-Fenton**

Proceso	Eficiencia
Fenton	11,72 %
Electro-Fenton	16,74 %

### **5.2.2. pH de las muestras**

La medida de acidez o alcalinidad del ril tratado se midió con papel pH, como resultado se obtiene una noción sobre el nivel de pH que contiene una determinada sustancia o disolución, en este caso el ril representativo de una industria química. El pH del ril tratado a escala de laboratorio se encuentra en el rango ácido de [3-5], luego de ser aplicado el proceso Fenton, se analizó la muestra final obteniendo un pH que se encuentra en el rango de [5-7]. En lo que respecta a la aplicación del proceso Electro-Fenton en el ril, se obtuvo que el pH de la muestra final analizada se mantuviera dentro del rango de [5-7].

Es decir, respecto al pH no hay diferencia entre la aplicación del proceso Fenton o el Electro-Fenton, siendo importante considerar que se obtiene un pH que se encuentra dentro de los parámetros exigidos por la normativa chilena 609/98.

### **5.2.3. Absorbancia de las muestras**

A las muestras obtenidas del proceso Fenton y Electro-Fenton respectivamente, se les midió la absorbancia en el espectrofotómetro en función de la longitud de onda.

Se analizó la muestra inicial del ril tratado y así se calcularon los pick de longitud de onda en el rango donde se encuentran las moléculas orgánicas e inorgánicas incoloras y el rango donde se encuentran las moléculas orgánicas e inorgánicas coloradas, estos valores fueron de 305 [nm] y de 436 [nm] respectivamente.

Luego de analizada la muestra inicial, se midió la absorbancia de las moléculas incoloras como se puede observar en la figura 12, es decir, a los 305 [nm], para las muestras obtenidas del proceso Fenton y Electro-Fenton. Se obtuvo que la degradación de los compuestos orgánicos en el proceso Fenton se mantuviera constante, es decir, el proceso tiene una baja selectividad sobre los compuestos orgánicos incoloros. En el proceso Electro-Fenton se obtuvo que la absorbancia de cada muestra dividido la absorbancia inicial disminuyó desde 1 hasta 0,53, demostrando así la baja selectividad para oxidar que tiene el proceso Electro-Fenton, comprobando la descripción bibliográfica del proceso.

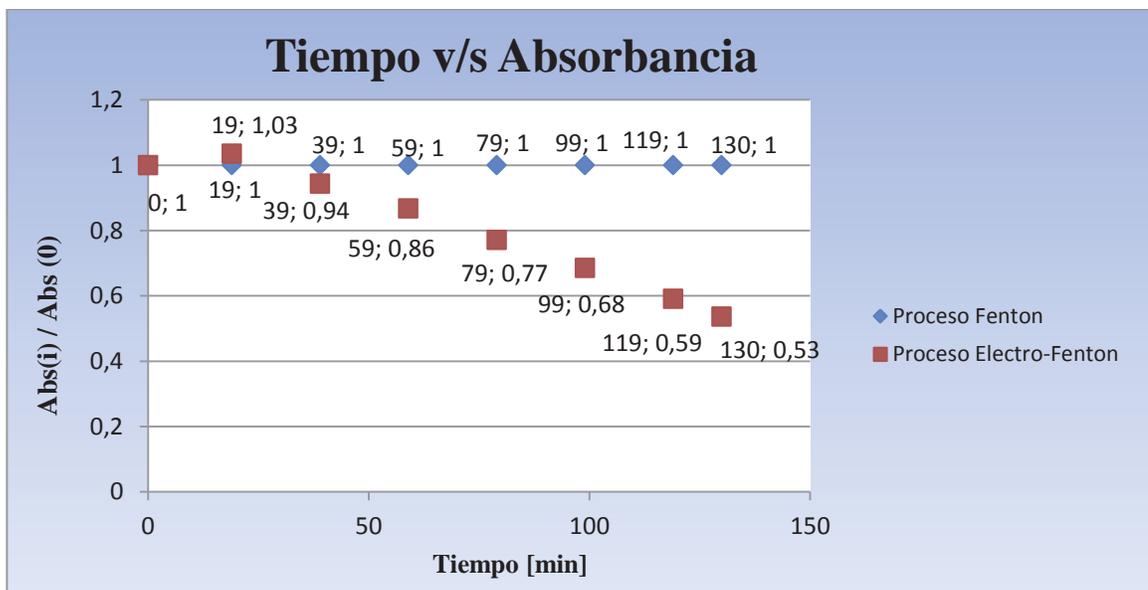


Figura 12. Gráfico comparativo del tiempo versus absorbancia de cada muestra a 305 [nm]

En consiguiente, se midió la absorbancia de las moléculas coloras, como se puede observar en la figura 13, es decir, a los 436 [nm], para las muestras obtenidas del proceso Fenton y Electro-Fenton. De la figura 13, se puede observar que el proceso Fenton tuvo una mayor degradación de los compuestos orgánicos e inorgánicos colorados en los últimos 40 [min] en cambio el proceso Electro-Fenton presentó una mayor degradación de estos compuestos en los primeros 40 [min] de reacción.

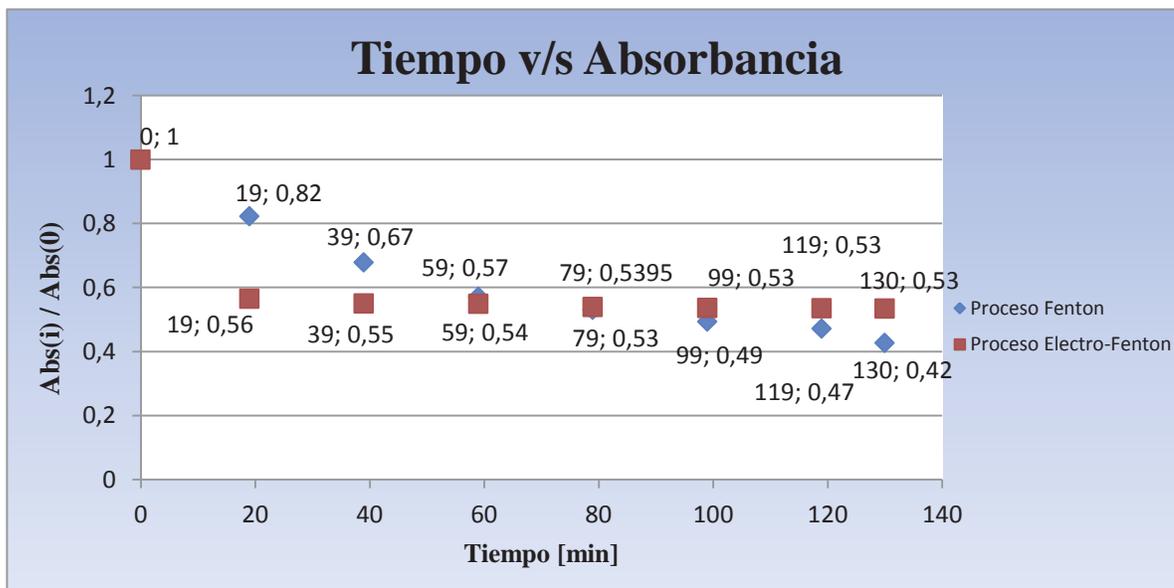


Figura 13. Gráfico comparativo del tiempo v/s absorbancia a 436[nm]

### 5.3. Análisis de factibilidad del proceso Electro-Fenton

Finalmente se procedió a realizar un análisis económico del proceso Fenton y Electro-Fenton, es decir, determinar los consumos específicos de energía e insumos involucrados en cada proceso y compararlos para determinar qué proceso es económicamente más rentable.

Debido a que el análisis es totalmente comparativo entre los dos procesos, fue necesario determinar el precio de compra del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , el cual es de \$29000 los 500 [g]. El valor del peróxido de hidrogeno no influye en los cálculos, ya que el proceso Fenton y Electro-Fenton utilizaron la misma dosificación. Otra consideración que se debe tener es que el voltaje promedio (26 [V]) puede ser reducido al agregar algún tipo de sal al proceso electroquímico, lo cual reduciría bastante el consumo de energía. También es de gran importancia tener en cuenta que el costo de la barra utilizada no fue tomado en cuenta, debido a que es posible suponer que se está usando fierro reciclado (chatarra de fierro no oxidada).

#### 5.3.1. Costos asignados al Proceso Fenton

En el proceso Fenton la relación molar de  $\text{H}_2\text{O}_2$  /  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  determina que cada 10 [g] de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  tiene un costo de \$0,58. Con la ecuación 5.4 se puede calcular la cantidad de dinero por  $\text{m}^3$  de ril tratado para el proceso Fenton llevado a cabo en el laboratorio 4 de la EIQ. Con los resultados experimentales de la demanda química de oxígeno se obtiene el  $\text{DQO}_i$  que corresponde a la cantidad total de materia orgánica presente en el ril y la  $\text{DQO}_f$  que corresponde a la cantidad de materia orgánica que se obtiene en el efluente ya tratado.

$$\left( \frac{\$ \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}}{(\text{DQO}_i - \text{DQO}_f) \cdot v} \cdot \text{DQO}_{\text{muestra}} \right) = \left[ \frac{\$}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde:

- \$  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ : cantidad de dinero por sulfato de hierro heptahidratado utilizado
- $\text{DQO}_{\text{muestra}}$  : demanda química de oxígeno del ril a tratar [ $\text{mg O}_2/\text{L}$ ]
- $\text{DQO}_i$  : demanda química de oxígeno inicial [ $\text{mg O}_2/\text{L}$ ]
- $\text{DQO}_f$  : demanda química de oxígeno final [ $\text{mg O}_2/\text{L}$ ]
- v: volumen de la muestra [L]

Reemplazando los valores descritos se obtiene la siguiente ecuación 5.5:

$$\left( \frac{0,58 [\text{\$}] \cdot 4282 \left[ \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]}{(4282 - 3780) \left[ \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] \cdot 6 [\text{L}]} \right) \cdot 1000 \left[ \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right] = 824 \left[ \frac{\text{\$}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Ecuación 5.5}$$

La cantidad de dinero por m<sup>3</sup> de ril tratado para el proceso Fenton fue de 824, lo cual indica el costo que conlleva la aplicación de éste tratamiento en la generación de residuos líquidos peligrosos generados por laboratorios de la EIQ.

### 5.3.2. Costos asignados al Proceso Electro-Fenton

Luego con los resultados experimentales de la DQO obtenidos posterior a la aplicación del tratamiento de riles con el proceso Electro-Fenton y el cálculo previo para determinar la eficiencia de corriente se aplicó la ecuación 5.6 para determinar la cantidad de dinero por m<sup>3</sup> de ril tratado para el proceso Electro Fenton:

$$\frac{V \cdot I \cdot t \cdot \$}{(DQO_i - DQO_f) \cdot v} \cdot DQO_{muestra} = \left[ \frac{\text{\$}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Donde:

- V: voltaje promedio de la celda [V]
- I: intensidad de corriente [A]
- t: tiempo [h]
- [31] \$: precio de cargo por energía base de CONAFE
- DQO<sub>i</sub> : demanda química de oxígeno inicial [mg O<sub>2</sub>/L]
- DQO<sub>f</sub> : demanda química de oxígeno final [mg O<sub>2</sub>/L]
- v: volumen de la muestra [L]
- DQO<sub>muestra</sub> : demanda química de oxígeno del ril a tratar [mg O<sub>2</sub>/L]

Reemplazando los valores descritos se obtiene la siguiente ecuación 5.7:

$$\left( \frac{26,5[V] \cdot 0,14[A] \cdot 2[h] \cdot 0,06769 \frac{\$}{[V \cdot A \cdot h]}}{(4282 - 3565) \left[ \frac{mg}{L} \right] \cdot 6[L]} \cdot 4282 \left[ \frac{mg}{L} \right] \right) \cdot 1000 \left[ \frac{L}{m^3} \right] = 500 \left[ \frac{\$}{m^3} \right]$$

**Ecuación 5.7**

La cantidad de dinero por m<sup>3</sup> de ril tratado para el proceso Electro-Fenton fue de 500, lo cual indica el costo que conlleva la aplicación de éste tratamiento en la generación de residuos líquidos peligrosos generados por laboratorios de la EIQ.

## 5.4. Conclusión

Finalmente se comparan estos resultados los cuales se pueden observar en la tabla 7, por lo tanto, al obtener que el proceso Electro-Fenton tiene menor costo por m<sup>3</sup> de ril tratado, se puede aceptar la hipótesis planteada de que “existen efectos sinérgicos en la aplicación del campo eléctrico y en la reacción Fenton que hacen que el proceso Electro-Fenton sea económicamente más rentable que el Fenton”. Además según el análisis realizado a las muestras se concluye que el proceso Electro-Fenton es menos selectivo para oxidar moléculas orgánicas e inorgánicas que el proceso Fenton.

**Tabla 7. Tabla comparativa de cantidad de dinero por m<sup>3</sup> de ril tratado**

Proceso	[\$/m <sup>3</sup> ]
Fenton	824
Electro-Fenton	500

## CAPITULO VI. TRABAJO EXPERIMENTAL 2

Según la caracterización y cuantificación de los riles generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. (descrito en el capítulo IV) y el análisis bibliográfico se buscó determinar los procesos más adecuados para mezclar los residuos generados y establecer los parámetros óptimos de reacción, tales como las dosificaciones, la temperatura y tiempo de reacción para realizar el trabajo experimental, cabe destacar que las dosificaciones exactas de los residuos líquidos se establecieron durante el proceso experimental, ya que las características de los riles varían según el establecimiento que los emite, por lo que los parámetros estudiados en el análisis bibliográfico no se pueden aplicar de manera exacta a los riles generados por la escuela.

Según la normativa chilena que establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado (norma; 609/98) se comparan los resultados obtenidos del desarrollo experimental con el objetivo de verificar si se cumple la hipótesis: “es posible tratar los residuos líquidos generados en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso logrando obtener agua residual que cumpla con los parámetros de la normativa chilena 609/98. Por medio de neutralización, precipitación y oxidación vía Electro-Fenton”.

### 6.1 Aplicación de los procesos a los riles de la EIQ

De acuerdo a la caracterización y cuantificación de los riles generados por la PUCV se procedió a realizar el proceso experimental 2.

En el estudio bibliográfico se analizaron las reacciones involucradas en el mezclamiento de los distintos tipos de riles generados, por los posibles gases tóxicos que pueden ser producidos, tales como, cloruro de hidrógeno, dióxido de azufre, óxido nítrico, fluoruro de hidrógeno, bromuro de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, cianuro de hidrógeno, yoduro de hidrógeno y amoníaco, los cuales pueden ser muy tóxicos para el ser humano y contaminantes para el medio ambiente, por lo que es de gran importancia absorberlos. Por lo que fue necesario diseñar una trampa de gases. Para ello en una probeta de 100 [ml] se agregaron 70 [ml] de NaOH saturado, ya que los gases altamente peligrosos, son principalmente de origen ácido.

Se utilizó un reactor de vidrio cerrado de 2 [L] para llevar a cabo el mezclamiento de los riles. Desde el reactor se conectó una manguera hacia la probeta que contiene la solución saturada de de NaOH como se puede observar en la figura 14.



**Figura 14. Conexión del reactor hacia la trampa de gases**

Al reactor cerrado de capacidad 2 [L] se agregaron 100 [ml] de solventes halogenados y 100 [ml] de solventes no halogenados, luego se procedió a agregar 50 [ml] de residuos líquidos que contienen metales pesados como se puede ver en la figura 15. Primero se realizó la mezcla de estos compuestos debido a la afinidad que tienen entre sí, ya que forman complejos orgánicos solubles y además los metales pesados cumplen la función de un catalizador en un medio ácido para la oxidación de la materia orgánica.

El tiempo de reacción fue de 30 [min], no se observa generación de gases tóxicos. La temperatura se mantuvo constante a 25°C, por lo cual no hubo problemas de exotermicidad y el pH se mantuvo en el rango de acidez.



**Figura 15. Mezcla de los riles orgánicos con los riles que contienen metales pesados**

En consiguiente se llevó a cabo el proceso de digestión agregando al reactor cerrado 700 [ml] de residuos ácidos, donde la materia orgánica se descompone hasta formar una pasta homogénea de color negro mate durante 2 horas y 25 [min] como se puede observar en la figura 16. Se aprecia que la reacción es exotérmica alcanzando una temperatura máxima de 35°C, cabe destacar que el calefactor fue encendido durante 15 [min], lo cual aumentó la temperatura de la solución. El pH se mantuvo en el rango de acidez. Se distinguió ningún color en el tubo de la trampa de gases, es decir, no hay generación de gases tóxicos debido a que las cantidades de riles tratados son a nivel de laboratorio.



**Figura 16. Riles ácidos son agregados al reactor**

De la mezcla de riles obtenemos un pH ácido, por lo que es necesario neutralizar la solución, agregando residuos líquidos alcalinos y el agente floculante  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Para poder llevar a cabo este procedimiento se agregaron 500 [ml] de residuos alcalinos generados por la Escuela de Ingeniería Química. Así se obtuvo un pH entre el rango de [3-4]. El tiempo de reacción fue de 3 horas y 18 [min], se observó que la reacción es exotérmica alcanzando una temperatura máxima de 25°C, donde la solución comienza a burbujear levemente. Es posible visualizar un tono amarillento en la manguera de la trampa de gases, pero es prácticamente imperceptible, debido a que las cantidades utilizadas para llevar a cabo el proceso experimental son pequeñas y se observa la formación de sólidos en suspensión en el reactor cerrado.

A la mezcla de riles se le aplicó el proceso Electro-Fenton, descrito en el estudio experimental 1 a las condiciones ya establecidas en el capítulo V como se observa en la figura 17.



**Figura 17. Aplicación del proceso Electro-Fenton a la mezcla de riles**

Finalmente, los últimos procesos involucrados son: precipitación y neutralización, por lo que se agregaron 16 [g] del floculante hidróxido de calcio en polvo, permitiendo así la aglomeración de partículas desestabilizadas que se depositan en el fondo del reactor y alcanzar un pH que se encuentra en el rango de [6 – 8]. Debido a la generación de lodos es necesario filtrar el agua tratada, obteniendo 42,8026 [g] de sólidos como se puede observar en la figura 18.



**Figura 18. Residuos sólidos obtenidos**

Se tomaron 5 muestras durante el proceso experimental 2, una corresponde a la mezcla de todos los residuos sin filtrar. Durante el proceso Electro-Fenton se tomaron 3 muestras y la última muestra fue tomada luego del proceso de floculación y post filtrado del agua tratada.

Estas muestras fueron analizadas en el laboratorio midiendo los parámetros que la normativa chilena 609/98 exige, descrita en el capítulo III.

## 6.2. Resultados

Los parámetros analizados en el laboratorio, según los equipos que se encuentran disponibles fueron: demanda química de oxígeno (DQO), pH, absorbancia y absorción atómica del ril tratado.

### 6.2.1. DQO de las muestras

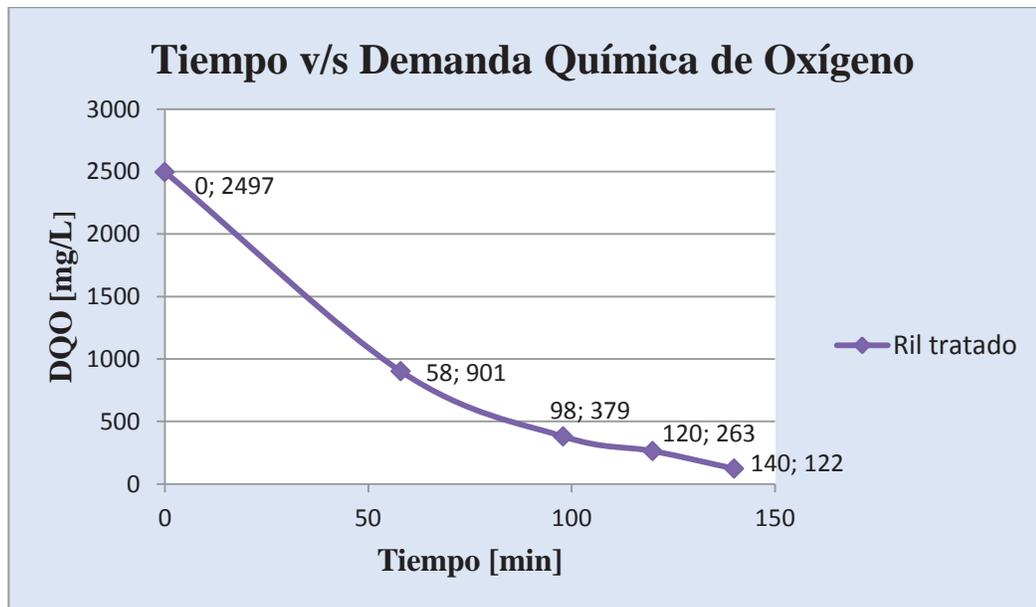
Se midió la demanda química de oxígeno de la muestra que corresponde a la mezcla de todos los residuos sin filtrar obteniendo 2497 [mg/L] y de la muestra final, es decir, luego del proceso de floculación y post filtrado del agua tratada obteniendo 122 [mg/L].

Con estos datos se puede calcular la eficiencia en relación a la degradación de los compuestos orgánicos, como se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8. Eficiencia de la DQO aplicando los procesos decritos**

Proceso	Eficiencia
<b>Electro-Fenton</b>	95,114 %

En la figura 19 se puede observar el tiempo versus demanda química de oxígeno correspondiente a las 5 muestras tomadas durante el proceso experimental, es importante considerar que la muestra 1 se obtuvo de la mezcla de los residuos halogenados y no halogenados, la muestra 2, 3 y 4 se obtuvieron durante la aplicación del proceso Electro-Fenton siendo relevante que la mayor reducción de la DQO se logró mientras se aplicaba este proceso y la muestra 5 se obtuvo luego de la aplicación del proceso de precipitación y filtración del efluente. Respecto a la demanda química de oxígeno, de la figura 19 se puede observar claramente la degradación de los compuestos orgánicos en el tiempo. Es de gran importancia tener en cuenta que el DQO varía en función de las características de los reactivos presentes en el ril tratado, pero el proceso Electro-Fenton tiene la ventaja de tener una baja selectividad para oxidar y además genera radicales hidroxilos ( $\text{OH}\cdot$ ) los cuales son oxidantes potentes no selectivos que pueden destruir organismos refractarios y tóxicos incluyendo los colorantes en el ril. El porcentaje de degradación obtenido es de 95,114% el cual es bastante satisfactorio, ya que demuestra la efectividad del mezclamiento de los diferentes tipos de riles que se llevó a cabo en el laboratorio, también el proceso de oxidación avanzada aplicado y los parámetros establecidos durante el proceso experimental, estos son las dosificaciones de reactivos, el pH, la temperatura, entre otros.



**Figura 19. Gráfico del tiempo versus DQO del ril tratado**

En relación a la normativa chilena 609/98, el ril tratado por los procesos ya descritos cumple con el rango de DQO establecido por la norma para poder descargar el efluente al sistema de alcantarillado como se puede observar en la tabla 9.

**Tabla 9. Comparación del DQO de la muestra con el establecido por la norma**

	<b>Trabajo Experimental 2</b>	<b>Normativa Chilena</b>
<b>DQO</b>	122 [mg/L]	< 250 [mg/L]

Es importante considerar que la normativa chilena establece que el DBO < 250 [mg/L], es decir, se compara la demanda química de oxígeno del ril tratado con la demanda bioquímica de oxígeno establecida por la normativa chilena, respecto a este punto es posible comparar estos valores, ya que el DQO es la cantidad de oxígeno expresado en [mg/L] consumido por las materias oxidables, es decir, es el total de la materia que se puede oxidar, por otra parte la DBQ sólo representa la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos aeróbicos, es decir materia oxidable biológicamente.

## 6.2.2. pH de las muestras

El pH obtenido del ril tratado por los procesos descritos se mantuvo en el rango de [6-8]. La temperatura se mantuvo en un rango de [20 – 25] °C. En la tabla 10 se puede observar la comparación de estos parámetros con la normativa chilena demostrando que estos se cumplen.

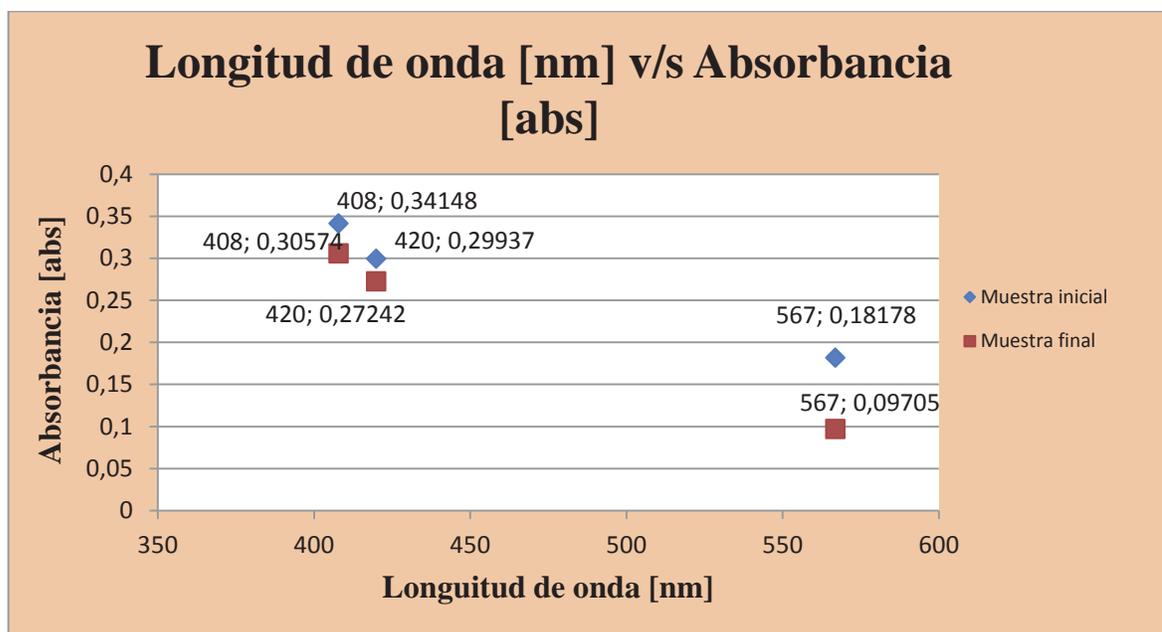
**Tabla 10. Comparación del pH y la temperatura de la muestra con la normativa**

	<b>Trabajo Experimental 2</b>	<b>Normativa Chilena</b>
<b>pH</b>	6-8	5,5 – 9,0
<b>Temperatura</b>	20°C	35°C

## 6.2.3. Absorbancia de las muestras

Para determinar la degradación de las moléculas coloradas e incoloras, se midió la absorbancia de la muestra inicial, es decir, el ril sin tratar, en el espectrofotómetro, fijándonos en los pick más altos: a los 567 [nm] de longitud de onda, obteniendo una lectura de la absorbancia de 0,18178 [abs], a los 420 [nm] de longitud de onda, obteniendo 0,29937 [abs] y a los 408 [nm] de longitud de onda, obteniendo 0,34148 [abs].

En consiguiente se procedió a medir la absorbancia de la muestra final, es decir, el efluente ya tratado por los procesos descritos, a los mismos pick de la muestra inicial, o sea, a los 567 [nm] de longitud de onda, obteniendo una lectura de absorbancia de 0,09705 [abs], a los 420 [nm] de longitud de onda, obteniendo una lectura de absorbancia de 0,27242 [abs] y finalmente a los 408 [nm] de longitud de onda, obteniendo una lectura de absorbancia de 0,30574 [abs] como se muestra en la figura 20.



**Figura 20. Gráfico de la longitud de onda [nm] versus absorbancia de las muestras**

En relación a la absorbancia, se puede observar en la figura 20 la disminución de esta en los pick de longitud de onda, es decir, en el rango donde se encuentran las moléculas orgánicas e inorgánicas coloradas.

Posteriormente se calcularon los porcentajes de reducción de color correspondiente a cada longitud de onda, como se pueden observar en la tabla 11.

**Tabla 11. Porcentajes de reducción de color de las muestras**

Longitud de onda $\lambda$ [nm]	Muestra inicial [abs]	Muestra final [abs]	% de reducción de color
567	0,18178	0,09705	46,611
420	0,29937	0,27242	9,002
408	0,34148	0,30574	10,466

En la tabla 11 se muestran los porcentajes obtenidos de reducción de color en los pick de longitud de onda del ril. Respecto a estos resultados, a los 567 [nm] el porcentaje de reducción de color fue el más alto, esto se debe a que las moléculas son más oxidables, mientras que en las longitudes de onda menores, es decir, a los 420 [nm] y 408 [nm] el porcentaje de reducción de color disminuyó, esto puede ser a que las moléculas son menos oxidables a un  $\lambda$  menor, demostrando así que el proceso establecido genera una alta degradación de compuestos orgánicos.

#### **6.2.4. Metales pesados en las muestras**

Finalmente se procedió a determinar la cantidad de metales pesados presentes en el ril y el efluente ya tratado.

Se midió la absorción atómica de la muestra inicial y final de los metales pesados, tales como arsénico, cadmio, cobre, níquel, plomo y zinc, ya que estos son los que se encuentran regularizados por la normativa chilena 609/98. Para el arsénico y el cadmio no se pudo obtener un resultado claro, ya que la cantidad de [mg/L] de estos en las muestras inicial y final son inferiores al límite de detección del equipo, es decir menor a 0,4400 [mg/L], de la muestra inicial del cobre se obtuvo 19,5 [mg/L] y de la muestra final 11,3 [mg/L], del níquel se obtuvo de la muestra inicial 0,96 [mg/L] y de la muestra final 0,75 [mg/L], del plomo se obtuvo de la muestra inicial 0,46 [mg/L] y de la muestra final 0,11 [mg/L] y finalmente del zinc se obtuvo de la muestra inicial 3,01 [mg/L] y de la muestra final 0,66 [mg/L]. Con los datos obtenidos se calcularon los porcentajes de reducción de la cantidad de estos metales pesados presentes en el ril tratado, como se puede observar en la tabla 12.

Respecto a los porcentajes de reducción de las cantidades de los metales pesados calculados, mostrados en la tabla 12, es posible comprobar que la cantidad de cobre reducido 11,3 [mg/L] en comparación con la cantidad de cobre establecida por la normativa chilena 3 [mg/L] no se cumple, esto puede ser debido a que este metal es más estable al pH neutro, por lo cual hace que sea más compleja la remoción de este metal presente en ril. La cantidad de arsénico y cadmio en las muestras finales se encuentran bajo el rango de la normativa chilena, ya que incluso estos son inferiores al límite de detección del equipo. Del plomo se obtuvo un porcentaje de reducción de 76,087 % lo que indica que fue posible precipitar la mayor cantidad de este presente en el ril tratado logrando así cumplir con la normativa chilena al igual que con el zinc.

**Tabla 12. Comparación de metales pesados presentes en el efluente con la normativa chilena**

<b>Metal</b>	<b>Muestra inicial [mg/L]</b>	<b>Muestra final [mg/L]</b>	<b>Normativa chilena [mg/L]</b>	<b>% de reducción de metales</b>
Arsénico	<0,4400	<0,4400	0,5	-
Cadmio	<0,0165	<0,0165	0,5	-
Cobre	19,5	11,3	3	42,05
Níquel	0,96	0,75	4	21,87
Plomo	0,46	0,11	1	76,08
Zinc	3,01	0,66	5	78,07

### **6.3. Conclusión**

El proceso experimental llevado a cabo en el laboratorio se concretó con éxito, logrando neutralizar el ril tratado. No se presenciaron problemas de exotermicidad, en general la temperatura se mantuvo dentro de los parámetros establecidos, logrando mantener esta a 20°C lo cual establece la normativa. El pH también se logró mantener neutro luego de realizar los procesos descritos anteriormente. En lo que concierne a los gases generados se observó que no hubo producción de estos durante el mezclamiento de los riles del laboratorio 1, lo cual indica que las dosificaciones de estos fueron adecuados para el proceso.

La aplicación del proceso Electro-Fenton es favorable para el tratamiento de riles, ya que este es poco selectivo al oxidar las moléculas orgánicas e inorgánicas coloradas e incoloras demostrado con el porcentaje de degradación obtenido, que fue del 95,114%.

El análisis de la absorbancia atómica de la muestra final del ril tratado demostró que el cobre no cumple con la normativa chilena 609/98 a pesar de que se obtuvo un porcentaje de degradación de 42,051 %. Esto se puede solucionar agregando un proceso para disminuir la cantidad de este metal, a rasgos generales este proceso es el de adsorción de metales pesados utilizando carbones activos (método de filtración) obteniendo un residuo sólido del cual se debe disponer posteriormente, pero la disminución de volumen de estos residuos, a pesar de que se generen, una de las ventajas y a diferencia de los desechos líquidos se debe a la densidad, ya que ocurre una reducción en volumen y peso lo cual implica una disminución en gastos de transporte.

Otro parámetro de relevancia que influye en la normativa chilena es la cantidad de sulfatos en el ríl tratado, debido a que no se encuentra un equipo disponible para medir la cantidad de [mg/L] de los sulfatos se realizó un análisis, siendo importante considerar que el ión sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  reacciona rápido con el calcio  $\text{Ca}^{+2}$  que se encuentra en exceso en la solución, en consecuencia precipita y se neutraliza como  $\text{CaSO}_4$  el sulfato.

La hipótesis planteada: “Es posible tratar los residuos líquidos generados en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso logrando obtener agua residual que cumpla con los parámetros de la normativa chilena 609/98. Por medio de neutralización, precipitación y oxidación vía Electro-Fenton” no es concretada cabalmente, ya que sólo un parámetro establecido en la normativa no cumple con el parámetro establecido, esto se debe a que las dosificaciones de los riles llevados a cabo en el laboratorio fue en base a datos teóricos, puesto que no existe un proceso establecido para realizar el mezclamiento de estos compuestos. También es importante considerar que los residuos líquidos de cada laboratorio varían de acuerdo a las condiciones de trabajo, el uso de estos, entre otras características. Por lo cual es necesario repetir las pruebas experimentales, para lograr obtener los parámetros óptimos del proceso, con el objetivo de cumplir con la normativa chilena, decreto norma; 609/98.

## CAPITULO VII TRABAJO EXPERIMENTAL 3

De acuerdo al estudio realizado (trabajo experimental 2), se logró cumplir con casi todos los parámetros exigidos por la normativa Chilena 609/98, sin embargo no se logró cumplir con la cantidad mínima de cobre permisible que debe tener el efluente. Por lo que se estudiaron nuevamente los procesos involucrados en el mezclamiento de los distintos tipos de residuos líquidos peligrosos generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Con el objetivo de disminuir los contaminantes en especial los metales pesados presentes en el ril.

En el análisis bibliográfico se buscó determinar los procesos más adecuados para mezclar los residuos generados en los laboratorios de la escuela con el objetivo de degradar la mayor cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos, la aglomeración de partículas desestabilizadas, obtener un pH neutro del agua residual, eliminar la mayor cantidad de metales pesados, entre otros. Para así obtener agua residual que cumpla con los parámetros exigidos por la normativa chilena 609/98.

### 7.1. Residuos químicos líquidos utilizados

Se utilizaron los residuos líquidos peligrosos que se encuentran ubicados en el laboratorio 1, estos son: residuos líquidos halogenados, no halogenados, soluciones ácidas, soluciones básicas y soluciones que contienen metales pesados al igual que en el trabajo experimental 2, como se puede observar en la figura 21.



Figura 21. Residuos líquidos utilizados en el proceso Experimental 3

## 7.2. Trampa para gases tóxicos

Respecto a los posibles gases tóxicos que pueden ser generados durante el mezclado de riles estudiados, se diseñó una trampa de gases. Para ello en una probeta de 100 [ml] se agregaron 70 [ml] de NaOH saturado, ya que los gases altamente peligrosos, son principalmente de origen ácido.

Se utilizó un reactor de vidrio cerrado de 2 [L] para llevar a cabo el mezclado de los riles. Desde el reactor se conectó una manguera hacia la probeta que contiene la solución saturada de NaOH como se puede observar en la figura 22.



Figura 22. Conexión del reactor hacia la trampa de gases

## 7.3. Aplicación del proceso de digestión ácida

Al reactor cerrado de capacidad 2 [L] se agregan 25 [ml] de residuos líquidos halogenados y 25 [ml] de residuos líquidos no halogenados. En consiguiente se agregaron 600 [ml] de residuos ácidos, los 600 [ml] se fueron agregando de a 50 [ml] hasta llegar al total, con agitación magnética durante la reacción. En la figura 23 se puede observar el proceso experimental llevado a cabo en el laboratorio.



**Figura 23. Mezcla de los residuos orgánicos y residuos ácidos**

El primer proceso involucrado en el mezclamiento de estos residuos es el tratamiento por digestión ácida, en el cual ocurre la descomposición de la materia orgánica, hasta formar una pasta homogénea de color negro mate. (Se destruyen los componentes orgánicos parcialmente y se liberan los elementos minerales), es decir, se oxida la materia orgánica.

Respecto a los parámetros de tiempo de reacción y temperatura, en la siguiente tabla 13 se puede observar el comportamiento de estos durante la reacción.

**Tabla 13. Comportamiento de la temperatura durante el proceso de digestión ácida**

Tiempo reacción [min]	Temperatura reacción °C
12	18
26	23
35	25
141	25

Esto demuestra que no hubo problemas de exotermicidad y el pH de la mezcla es de 2. Se observó que la solución se torna café con sólidos en suspensión. Respecto a la generación de gases no se observa algún cambio de color en la manguera u olor tóxico en el ambiente.

Luego se filtra la solución, obteniendo un sólido de color anaranjado como se puede observar en la figura 24.

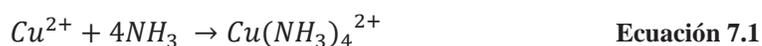


**Figura 24. Lodo precipitado del proceso de digestión ácida**

La cantidad de sólidos filtrados durante el mezclamiento de estos residuos líquidos peligrosos es de: 0,09 [g]. Esta cantidad de sólidos se obtuvo durante la aplicación del proceso de digestión ácida.

#### **7.4. Aplicación del proceso de precipitación alcalina**

En forma paralela en un vaso de precipitado de capacidad 1 [L], se agregaron 8 [ml] de solución de metales pesados en medio ácido, el pH correspondiente es igual a 1. En consiguiente se agregaron 600 [ml] de residuos alcalinos cuyo pH es 11, los 600 [ml] se fueron agregando de a 50 [ml] hasta llegar al total. En la figura 25 se puede observar el proceso llevado a cabo en el laboratorio. [32] Es importante considerar que el tono levemente azul se debe a que el ion amonio junto con el cobre forma un complejo amoniacal estable de color azul intenso. Como se describe en la siguiente ecuación 7.1 de la reacción entre el cobre y el ión amonio:



Según la disociación del ion amonio, descrita en la ecuación 7.2:





**Figura 25. Mezcla de riles que contienen metales pesados y alcalinos**

El proceso involucrado en el mezclamiento de estos residuos es la remoción de metales pesados mediante precipitación alcalina, el objetivo es la formación de hidróxidos metálicos mediante la alcalinización de la solución, la reacción consiste en llevar el efluente con metales disueltos al pH de mínima solubilidad del metal en cuestión (producto de solubilidad).

Respecto a los parámetros de tiempo de reacción y temperatura, en la siguiente tabla 14 se puede observar el comportamiento de estos durante la reacción.

**Tabla 14. Comportamiento de la temperatura durante el proceso de precipitación alcalina**

Tiempo reacción [min]	Temperatura reacción °C
5	18
9	18
15	17
23	17
35	18

Esto demuestra que no hubo problemas de exotermicidad y el pH de la mezcla es de 11. Se observó que la solución adquiere una tonalidad de color azul oscuro y en el fondo la formación de una pequeña cantidad de sólidos muy similar a la tierra o polvo. El olor es bastante perceptible.

Luego, se filtra la solución, para retirar el precipitado que se deposita en el fondo del recipiente como se puede observar en la figura 26.



**Figura 26. Lodo precipitado del proceso de precipitación alcalina**

La cantidad de sólidos filtrados durante el mezclamiento de estos riles y aplicando el proceso descrito es de: 0,2 [g].

En la figura 27 se puede observar la mezcla de residuos líquidos que contienen metales pesados con residuos alcalinos y la mezcla de residuos orgánicos con residuos ácidos, luego del proceso de filtración.



**Figura 27. Efluente obtenido luego del proceso de precipitación alcalina y de digestión ácida**

## 7.5. Aplicación del Proceso Electro-Fenton

Luego de aplicar el proceso de digestión ácida a los riles, se aplica el Proceso Electro-Fenton estudiado en el capítulo V, es decir, los parámetros establecidos durante el proceso experimental 1 donde se estudió la reacción Fenton y la aplicación electroquímica a ésta fueron utilizados en este proceso. Es decir, la dosificación de peróxido de hidrogeno al 15 % P/V que se debe agregar a la solución, el tiempo de reacción, la corriente aplicada, el voltaje promedio y el ión ferroso que se obtiene del ánodo, la placa de acero empleada durante el proceso experimental.

[33] Se utilizaron placas de acero, debido a que su principal componente (elemento que forma la aleación) es el hierro, al cual se le añade una pequeña cantidad de carbono. Estas placas fueron obtenidas del laboratorio 1. A nivel de planta, ya que la cantidad de hierro a utilizar es mayor, es posible obtenerla de chatarra estas placas y así abaratar costos en materia prima.

En la figura 28 se puede observar la conexión del reactor de capacidad 2 [L], con el efluente tratado mediante digestión ácida, hacia la fuente de poder con el fin de aplicar el Proceso Electro-Fenton.



**Figura 28. Conexión del reactor con la fuente de poder**

Al comenzar el proceso Electro-Fenton se observa que se oscureció la solución a un tono café oscuro con sólidos en suspensión. Respecto a la temperatura, se mantuvo en el rango entre  $[18 - 20]^\circ\text{C}$ . el pH se mantuvo constante en 2. Luego de las 2 horas de reacción se observa claramente que perdió color, es decir, el efluente se encuentra más transparente con una gran cantidad de sólidos depositados en el fondo del reactor y la turbidez disminuyó considerablemente.

Luego se procedió a filtrar la solución obteniendo: 0,25 [g]

En la figura 29 se puede observar el efluente obtenido luego de haber aplicado el proceso Electro-Fenton y post filtración.



**Figura 29. Efluente luego de la aplicación del proceso Electro-Fenton**

## **7.6. Aplicación de los procesos de neutralización y floculación**

Finalmente los últimos procesos involucrados son los de neutralización y floculación. La neutralización comienza mezclando el efluente ácido obtenido luego del proceso Electro-Fenton con el efluente alcalino obtenido posterior a la aplicación del proceso de precipitación alcalina. Finalmente se agrega el agente floculante  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que al ser una base fuerte reacciona fácilmente con la solución ácida atacando principalmente a varios de los metales pesados aun presentes en el efluente. Y así se obtiene el pH neutro exigido por la normativa chilena. En consiguiente se detalla el procedimiento que fue realizado en el laboratorio.

Al reactor cerrado de capacidad 2 [L], que contiene la solución ácida de aproximadamente 650 [ml], se fueron agregando de a 50 [ml] la solución básica hasta agregar todo el efluente básico de aproximadamente 608 [ml], midiendo según la dosificación y el tiempo de reacción, la temperatura del efluente y el viraje del pH, como se puede observar en la siguiente tabla 15.

**Tabla 15. Comportamiento de la temperatura y el pH del efluente**

Tiempo reacción [min]	Temperatura reacción °C	pH
5	18	2
11	18	2
17	17	2,5
35	17	3
43	18	4

Debido a que el efluente no ha sido neutralizado aún y se mantiene en el rango de acidez, se agrega el agente floculante de origen básico,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Se añaden 8 [g] de cal hidratada al reactor cerrado de capacidad 2 [L] que contiene el efluente tratado, la reacción se lleva a cabo durante 90 [min] con agitación magnética. La temperatura se mantuvo constante a temperatura ambiente y el pH obtenido fue de 6,5.

En consiguiente se procedió a filtrar el efluente obteniendo 30,0937 [g] post proceso de floculación.

En la figura 30 se puede observar el efluente obtenido luego de los procesos descritos.



**Figura 30. Efluente luego de la aplicación del proceso de neutralización y de floculación**

## 7.7. Aplicación del proceso de adsorción con carbón activo

Finalmente, se procede a llevar a cabo el proceso de adsorción, utilizando 115,2 [g] de carbón activo. Se realiza este procedimiento con un lecho empacado con carbón activo como se muestra en la figura 31. Donde el efluente es agregado por la parte superior y cae por gravedad, mientras el carbón activo realiza su función, como fue descrito en el análisis bibliográfico.



**Figura 31. Proceso de adsorción con carbón activo**

Luego del proceso de adsorción se obtiene un efluente de color oscuro, por lo que se filtra el agua tratada. Al filtrar el efluente, para eliminar el carbón activo presente en este, se obtiene un líquido de color transparente sin sólidos en suspensión, como se observa en la figura 32.



**Figura 32. Efluente luego de ser aplicados los procesos descritos**

Durante el procedimiento llevado a cabo en el laboratorio se tomaron 4 muestras, como se puede observar en la figura 33, las cuales fueron analizadas en el laboratorio para así determinar si cumplen con los parámetros exigidos por la normativa chilena 609/98.

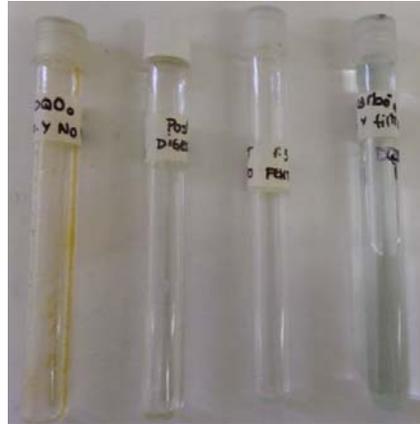


Figura 33. Muestras obtenidas luego de la aplicación de los procesos descritos

## 7.8. Resultados

Los parámetros analizados en el laboratorio, según los equipos que se encuentran disponibles fueron: demanda química de oxígeno (DQO), pH, absorbancia y absorción atómica del ril tratado.

### 7.8.1. DQO de las muestras

Se midió la demanda química de oxígeno de las 4 muestras, es decir, la primera que corresponde a la mezcla de residuos halogenados y no halogenados (para obtener la cantidad total de DQO presente en el ril), la segunda muestra corresponde al ril luego de ser aplicado el proceso de digestión, la tercera muestra es del ril luego de ser tratado con el proceso Electro-Fenton y finalmente la cuarta muestra analizada corresponde al efluente obtenido luego de la aplicación de todos los procesos descritos.

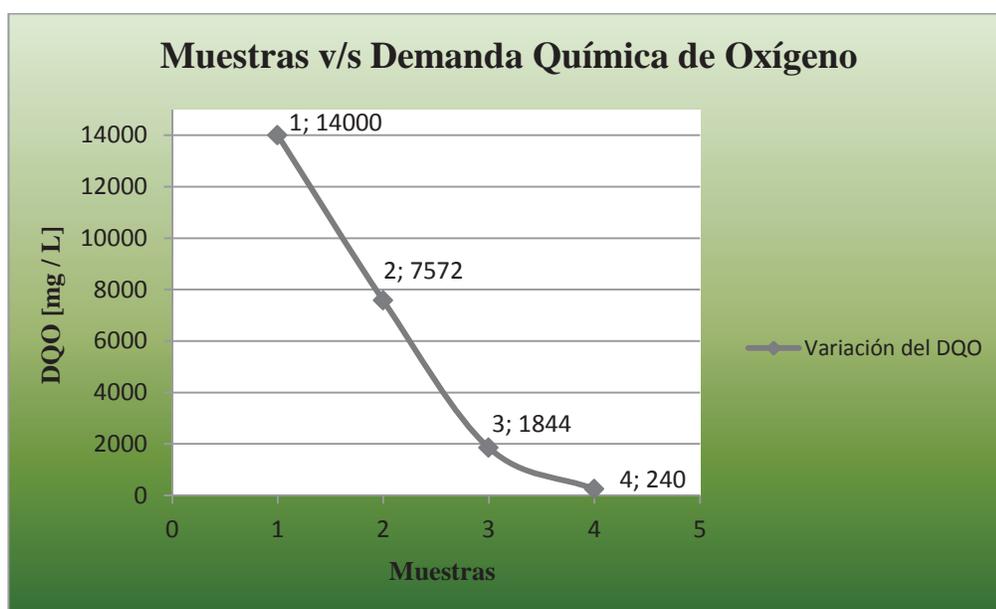
La muestra inicial obtuvo un DQO de 14000 [mg/L] y la muestra final un DQO de 240 [mg/L].

Con estos datos se puede calcular la eficiencia en relación a la degradación de los compuestos orgánicos, como se muestra en la tabla 16.

**Tabla 16. Eficiencia del DQO aplicando el proceso Electro-Fenton**

Proceso	Eficiencia
<b>Electro-Fenton</b>	98,28 %

En la figura 34 se puede observar la disminución del DQO respecto a las muestras analizadas en el laboratorio. En la parte experimental 2 se dan los argumentos que explican los factores influyentes en obtener una degradación de compuestos orgánicos tan alto, lo cual se ve reflejado en la eficiencia obtenida del DQO nuevamente.



**Figura 34. Gráfico de la variación del DQO de cada muestra**

En relación a la normativa chilena 609/98, el ril tratado por los procesos ya descritos cumple con el rango de DQO establecido por la norma para poder descargar el efluente al sistema de alcantarillado como se puede observar en la tabla 17.

**Tabla 17. Comparación del DQO del ril tratado con la normativa**

	Trabajo Experimental 3	Normativa Chilena
<b>DQO</b>	240 [mg/L]	< 250 [mg/L]

Es importante considerar que la normativa chilena establece que el DBO < 250 [mg/L], es decir, se compara la demanda química de oxígeno del ril tratado con la demanda bioquímica de oxígeno establecida por la normativa chilena, respecto a este punto es posible comparar estos valores, ya que el DQO es la cantidad de oxígeno expresado en [mg/L] consumido por las materias oxidables, es decir, es el total de la materia que se puede oxidar, por otra parte la DBQ sólo representa la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos aeróbicos, es decir materia oxidable biológicamente.

### 7.8.2. pH de las muestras

El pH obtenido del ril tratado por los procesos descritos se mantuvo en el rango de [6-8]. La temperatura se mantuvo constante a 20°C. En la tabla 18 se puede observar la comparación de estos parámetros con la normativa chilena demostrando que se cumplen con estos parámetros establecidos.

**Tabla 18. Comparación del pH y la temperatura del efluente con normativa**

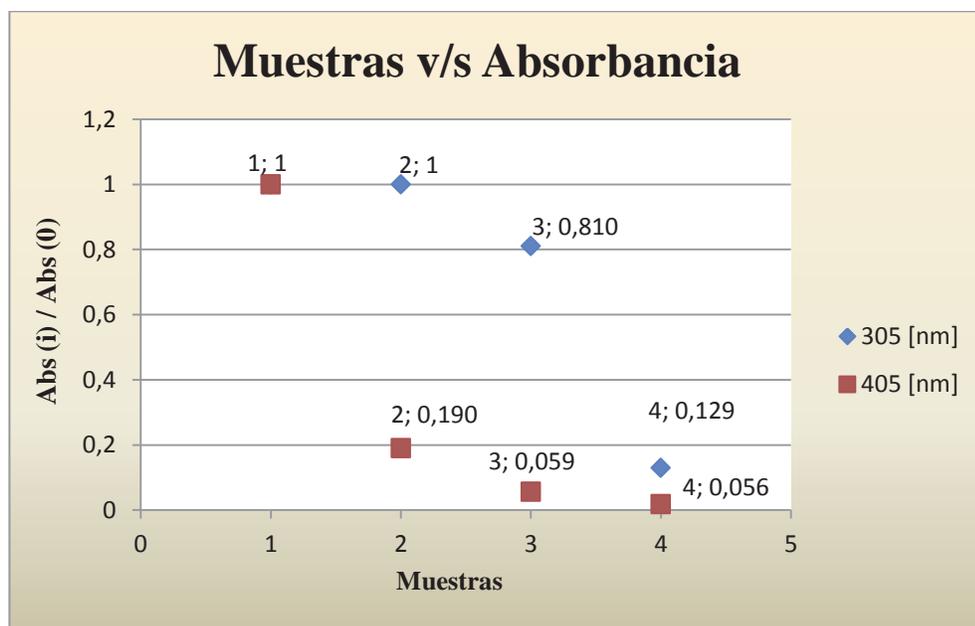
	<b>Trabajo Experimental 3</b>	<b>Normativa Chilena</b>
<b>pH</b>	6,5	[5,5 – 9,0]
<b>Temperatura</b>	20°C	35°C

### 7.8.3. Absorbancia de las muestras

A las 4 muestras obtenidas luego de aplicar el proceso de precipitación alcalina, digestión ácida, Electro-Fenton, floculación y adsorción con carbón activo se les midió la absorbancia en el espectrofotómetro en función de la longitud de onda.

Se analizó la muestra inicial del ril tratado y así se calcularon los pick de longitud de onda en el rango donde se encuentran las moléculas orgánicas e inorgánicas incoloras y el rango donde se encuentran las moléculas orgánicas e inorgánicas coloradas, estos valores fueron de 305 [nm] y de 405 [nm] respectivamente.

Luego de analizada la muestra inicial, se midió la absorbancia de las moléculas incoloras como se puede observar en la figura 35, es decir, a los 305 [nm], de las muestras obtenidas. Y luego se midió la absorbancia de las moléculas coloradas como se puede observar en la figura 35, es decir a los 405 [nm]. Se puede observar que la degradación de las moléculas coloradas fue mayor en comparación con las moléculas incoloras, lo cual se vio reflejado en el efluente obtenido luego de la aplicación de los distintos métodos de tratamientos de riles empleados en el trabajo experimental 3.



**Figura 35. Gráfico de la variación de la absorbancia de las muestras obtenidas**

En la siguiente tabla 19 se puede observar que la absorbancia de las moléculas incoloras, es decir, a los 305 [nm] disminuyó desde los 3 a los 0,389, por lo tanto el porcentaje de reducción de color para las moléculas incoloras fue de 87,03 %. La absorbancia de las moléculas coloradas, es decir, a los 405 [nm] disminuyó desde los 2,638 hasta los 0,048, por lo tanto, el porcentaje de reducción de color para las moléculas coloradas fue de 98,18 %. Es decir el proceso Electro-Fenton fue más eficiente con la degradación de la materia orgánica presente en las moléculas coloradas.

**Tabla 19. Porcentajes de reducción de color a los 305 [nm] y 405 [nm]**

Longitud de onda $\lambda$ [nm]	Abs (i)	Abs (f)	% de reducción de color
305	3	0,389	87,03
405	2,638	0,048	98,18

#### **7.8.4. Metales pesados en las muestras**

Por último se midió la absorción atómica de la muestra inicial, es decir, se midió la cantidad de metales pesados presentes en el ril y de la muestra final (el efluente ya tratado con los procesos descritos, digestión ácida, precipitación alcalina, Electro-Fenton, floculación y adsorción con carbón activo). Se midió la cantidad de metales pesados por [mg/L] presentes en el ril. Los metales pesados analizados fueron: arsénico, cadmio, cobre, níquel, plomo y zinc, ya que estos son los que se encuentran regularizados por la normativa chilena 609/98.

Para el arsénico y el cadmio se obtuvieron porcentajes de reducción del metal presentes en el efluente de 74,56 % y 94,50 % respectivamente. Estos valores fueron calculados considerando: la cantidad inicial de estos metales presentes en el ril sin tratar y el valor mínimo de detección del equipo obtenido del efluente tratado, pero que sigue estando bajo el límite máximo permitido en [mg/L] por la normativa chilena. Lo cual indica que se cumple con la cantidad de arsénico y cadmio que puede tener el efluente establecido en la normativa chilena 609/98, como se puede observar en la tabla 20.

Respecto a la cantidad de cobre presente en el ril sin tratar, de la muestra inicial, se obtuvo 21 [mg/L] y de la muestra final 2,5 [mg/L]. Obteniendo un porcentaje de reducción bastante alto de 88,09 % Cumpliendo así lo establecido por la normativa chilena, como se puede observar en la tabla 20.

Para el níquel y el plomo no se pudo obtener un resultado exacto, ya que la cantidad de [mg/L] de estos en las muestras inicial y final son inferiores al límite de detección del equipo, es decir menor a 0,055 [mg/L] y 0,077 [mg/L] respectivamente. Lo cual nos indica que se cumple con la cantidad de níquel y plomo que puede tener el efluente, ya que la cantidad presente en este está bajo el rango de detección del equipo, como se puede observar en la tabla 20.

Para el metal pesado zinc, de la muestra inicial, se obtuvo 27,67 [mg/L] y de la muestra final 2,88 [mg/L], obteniendo así, un porcentaje de reducción de este metal de 89,59%. Al comparar con la normativa chilena 609/98, se comprueba que la cantidad de zinc presente en el efluente cumple con lo exigido por la normativa chilena que permite la descarga de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado como se puede observar en la tabla 20.

**Tabla 20. Comparación de metales pesados presentes en el efluente con la normativa**

<b>Metal</b>	<b>Muestra 1 inicial [mg/L]</b>	<b>Muestra final (neutro) [mg/L]</b>	<b>Normativa chilena [mg/L]</b>	<b>% de reducción de metales</b>
<b>Arsénico</b>	1,73	< 0,4400	0,5	74,56
<b>Cadmio</b>	0,3	< 0,0165	0,5	94,50
<b>Cobre</b>	21	2,5	3	88,09
<b>Níquel</b>	<0,055	< 0,055	4	-
<b>Plomo</b>	< 0,077	< 0,077	1	-
<b>Zinc</b>	27,67	2,88	5	89,59

## **7.9. Conclusión**

El proceso experimental llevado a cabo en el laboratorio se concretó con éxito, logrando neutralizar el ril tratado. No se presenciaron problemas de exotermicidad, en general la temperatura se mantuvo dentro de los parámetros establecidos, logrando mantener esta a 20°C lo cual establece la normativa. El pH también se logró mantener neutro luego de realizar los procesos descritos anteriormente. En lo que concierne a los gases generados se observó que no hubo producción de estos durante el mezclamiento de los riles generados por la EIQ, lo cual indica que las dosificaciones de estos fueron adecuados para el proceso.

La aplicación del proceso Electro-Fenton es favorable para el tratamiento de riles, ya que este es poco selectivo al oxidar las moléculas orgánicas e inorgánicas coloradas e incoloras demostrado con el porcentaje de degradación obtenido, que fue del 98,28 %.

Otro parámetro de relevancia que influye en la normativa chilena es la cantidad de sulfatos en el ril tratado, debido a que no se encuentra un equipo disponible para medir la cantidad de [mg/L] de los sulfatos se realizó un análisis, siendo importante considerar que el ión sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  reacciona rápido con el calcio  $\text{Ca}^{+2}$  que se encuentra en exceso en la solución, en consecuencia precipita y se neutraliza como  $\text{CaSO}_4$  el sulfato.

Comparando los porcentajes de reducción de cobre del proceso experimental 2 y 3, es decir, 42,05% y 88,09% respectivamente, el aumento de este porcentaje se debe básicamente al cambio de procedimiento en la mezcla de los riles generados en la escuela. Ya que se agregaron dos procesos al trabajo experimental 3, el proceso de precipitación alcalina y el de adsorción con carbón activo, los cuales fueron muy efectivos en la reducción de metales pesados presentes en el ril. Con el objetivo principal de reducir la cantidad de cobre presente en este y así poder cumplir con el máximo permitido en [mg/L] de cobre presente en el ril lo cual se logró a cabalidad.

Finalmente, al obtener un proceso que cumple con los parámetros establecidos por la normativa chilena 609/98, se propone un proceso a escala real para tratar los residuos químicos líquidos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y finalmente se analiza la factibilidad de instalar una planta de tratamiento de riles en la universidad.

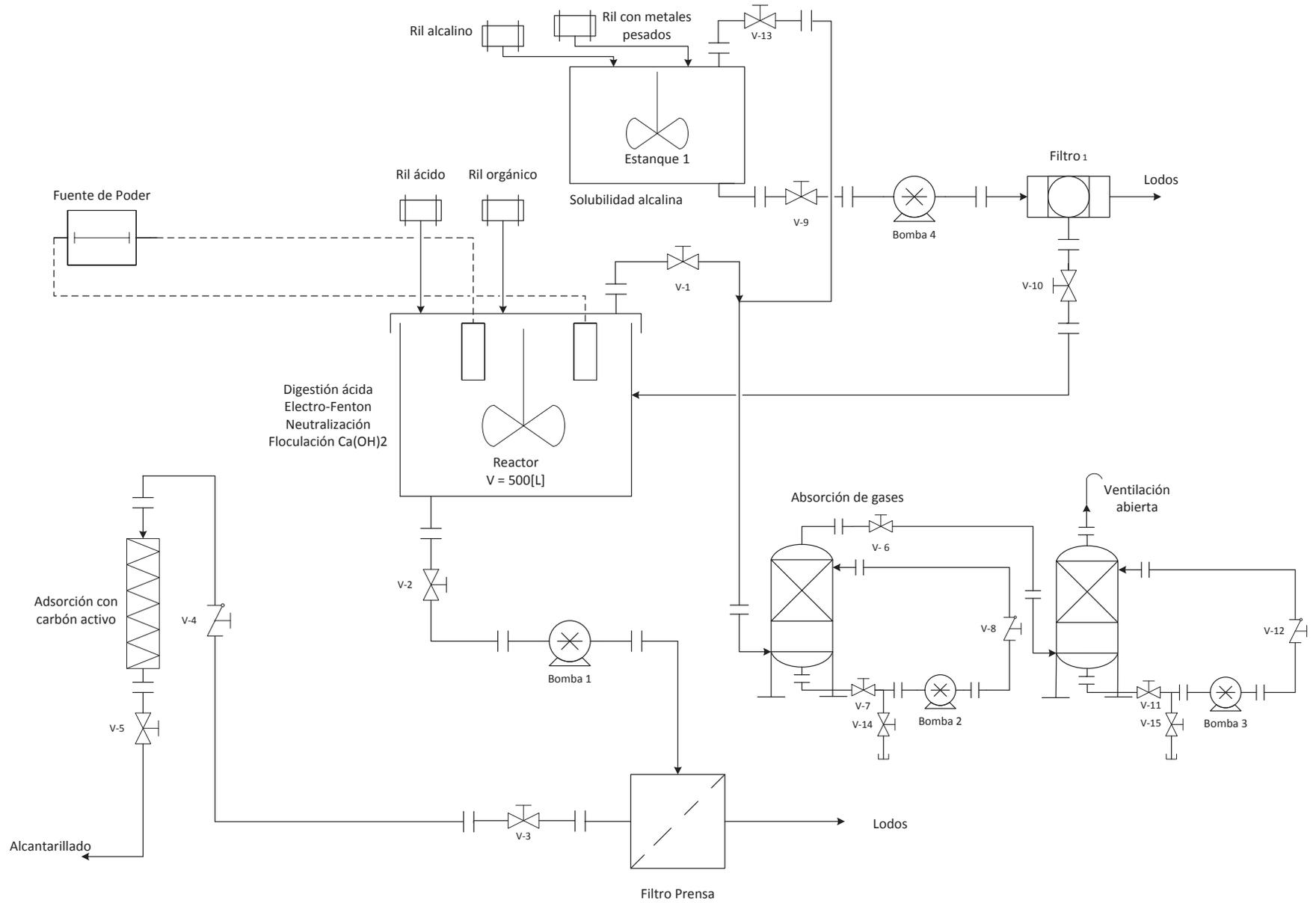
## **CAPÍTULO VIII DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO PROPUESTO A ESCALA REAL**

Ya obtenido el proceso, a escala de laboratorio, que permite tratar los residuos líquidos peligrosos generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y que cumple con los parámetros exigidos por la normativa chilena 609/98, se procede a realizar los balances de masas correspondientes a los flujos de riles generados por el centro de estudio, a escala real. Se realiza una descripción de los equipos a utilizar en el diseño de la planta de tratamiento de riles, como se puede observar en la figura 36.

De acuerdo a las cantidades de riles generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, que fueron descritos en el capítulo IV y las cantidades usadas en el proceso experimental 3 se determinaron las cantidades de riles, reactivos, entre otros, que se deben dosificar en los procesos correspondientes y también se determinaron las cantidades de riles generadas a escala real de acuerdo a las proporciones obtenidas a escala de laboratorio. Es posible realizar un escalamiento de las cantidades de materias primas utilizadas en los procesos según las estequiometrias de las reacciones involucradas.

A continuación se realizarán los balances de masa correspondientes a cada equipo empleado para la aplicación de los procesos involucrados en la degradación de compuestos contaminantes presentes en el ril, estos procesos son:

- Precipitación Alcalina
- Digestión Ácida
- Electro-Fenton
- Neutralización
- Floculación
- Adsorción
- Filtraciones



**Figura 36. Flowsheet de la planta de tratamiento de riles propuesta**

## 8.1. Descripción del proceso de la planta propuesta

La planta propuesta realizará los tratamientos involucrados en la descontaminación de aguas que contienen contaminantes, por lotes. Es decir, se iniciará el proceso agregando al estanque 1 0,2 [kg] del agente floculante cal, 41 [kg] de ril alcalino y 32 [kg] de ril que contiene metales pesados, el tiempo correspondiente a este proceso es de 1 [h] aplicando agitación mecánica. El proceso involucrado en esta etapa es la precipitación alcalina. Finalizado este proceso se abre la válvula v-9, como indica la figura 36, y sale un flujo que contiene lodos, por lo tanto, pasa al filtro 1 para separar los lodos del efluente. En el proceso de filtración 1 se obtienen 0,774 [kg]. El fluido se recircula hacia el reactor cerrado de capacidad 500 [L]. Paralelamente en el reactor se agregan 241 [kg] de ril ácido con 126 [kg] de ril orgánico para aplicar el proceso de digestión ácida durante 2 [h]. Luego se conecta la fuente de poder a las placas de hierro que se encuentran en el interior del reactor agregando 32 [kg] de  $H_2O_2$  llevando a cabo el proceso avanzado de oxidación, Electro-Fenton, durante 3 [h]. Debido a que tenemos un efluente ácido se abre la válvula de recirculación proveniente del estanque 1, el cual contiene un efluente alcalino, para lograr obtener un pH neutro. Posteriormente se agrega al reactor 2,6 [kg] de cal para completar el proceso de neutralización y aplicar el proceso de floculación durante 1 [h]. Al aplicar los procesos descritos se vuelve a obtener un efluente con lodos por lo cual se abre la válvula v-2 para que el flujo pase al filtro prensa donde se obtienen 8,23 [kg] de lodos y 465,77 [kg] de efluente. Finalmente los 465,77 [kg] pasan al adsorbedor que contiene carbón activo para terminar de aplicar los procesos que disminuyen la cantidad de contaminantes presentes en el efluente. Obteniendo 464,77 [kg] el cual corresponde a una corriente de líquido que cumple con los límites máximos permitidos de contaminantes que puede tener el efluente para poder ser descargado al alcantarillado (normativa chilena 609/98).

Es importante tener en consideración que a escala real va a existir la emisión de gases altamente tóxicos, tanto ácidos como alcalinos. Debido a esta razón se realizó un estudio bibliográfico en el cual se determinó un valor conservativo del 0,01% de la masa total que entra al equipo, como emisión de gases tóxicos. Es decir, del estanque 1 se obtendrían 0,00732 [kg] y del reactor 0,0474 [kg] los cuales están conectados a través de cañerías que se dirigen a los absorbedores de gases.

A continuación se hará una descripción detallada de los balances de masas realizados a cada equipo que se muestran en el flowsheet (figura 36).

## 8.2. Balances de masas de los equipos

De acuerdo a la capacidad del reactor que se encuentra disponible en el laboratorio de operaciones unitarias (el cual será descrito más adelante) de la escuela de Ingeniería Química, el cual, se encuentra en desuso y las cantidades de riles generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso durante un año, se determinó el funcionamiento de la planta de tratamientos de riles propuesta.

En consecuencia, se determinó que la planta realizará el tratamiento de los riles generados por la PUCV durante un año por lotes, es decir, la planta trabajará durante un año para tratar 18 cargas de riles funcionando 2 veces al mes desde abril hasta diciembre.

Para realizar los balances de masas respectivos, fue necesario transformar las cantidades utilizadas a nivel laboratorio de volumen a masa. Debido a que no se tiene la densidad exacta de cada ril, se utilizó para el ril ácido la densidad de un ácido concentrado, en este caso, el ácido sulfúrico, la cual es de  $\delta = 1,84$  [kg/L], para el resto de los residuos se consideró la densidad del agua. Estas consideraciones no influyen mayormente en los balances de masa realizados, ya que, el análisis que se llevará a cabo, tal como la cotización de quipos, entre otros, se realizará en un rango de flujos, por lo tanto, no influye la inexactitud de las densidades respectivas empleadas.

### 8.2.1. Balance de masa al estanque 1

A continuación se realizarán los balances de masa de cada equipo correspondiente a un lote.

Como se puede observar en la figura 37, en el estanque se llevará a cabo el proceso de precipitación alcalina. La cantidad de materia prima que se agregará fue determinada según las proporciones utilizadas a nivel de laboratorio, obteniendo las siguientes cantidades en [kg], como se puede observar en la figura 37 y en la tabla 21, este escalamiento es posible realizarlo debido a las relaciones estequiométricas de las reacciones químicas generadas en el proceso. Es importante considerar que en el proceso experimental no se midió la cantidad de gases tóxicos producidos, debido a que era muy pequeña prácticamente imperceptible. Pero a escala real la cantidad de gases tóxicos de origen básico o ácido que se pueden generar pueden ser bastante perjudiciales, tanto para el ser humano, como para el medio ambiente. En base a lo descrito, se consideró que la producción de éstos gases tóxicos es mínima, que se encuentra dentro de un rango de: [0,005% - 0,015%], para obtener la cantidad de gases tóxicos producidos utilizaremos un valor conservativo de 0,01 % de la masa total que ingresa al estanque 1.

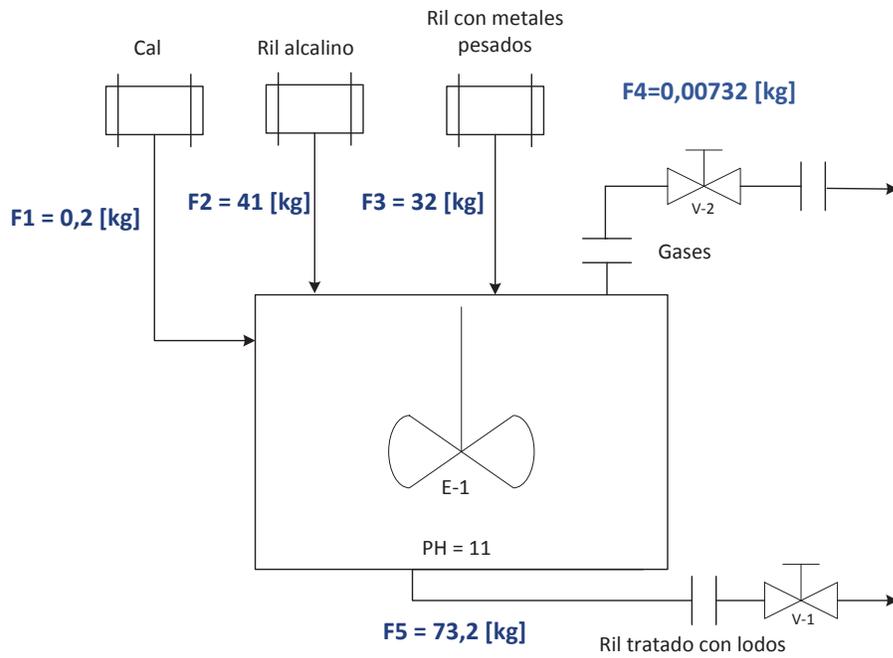


Figura 37. Balance de masa del estanque 1

Tabla 21. Balance de masa del estanque 1

Nomenclatura	Compuesto	Flujos de entrada	Flujos de salida
F1	Ca(OH) <sub>2</sub>	0,2 [kg]	-
F2	Ril alcalino	41 [kg]	-
F3	Ril MP	32 [kg]	-
F4	Gases	-	0,00732 [kg]
F5	Efluente	-	73,2 [kg]

## 8.2.2. Balance de masa al filtro 1

En consiguiente el F5, que corresponde al ril tratado con el proceso de precipitación alcalina, el cual se encuentra con lodos precipitados que contienen metales pesados, pasa al filtro 1 como se puede observar en la figura 38. En esta etapa del proceso se separa el efluente de los lodos y se recircula el fluido alcalino hacia el reactor para llevar a cabo el proceso de neutralización de los riles ácidos.

En la figura 38 se puede observar el balance de masa correspondiente al filtro 1 y en la tabla 22 se pueden observar los balances de masas correspondientes.

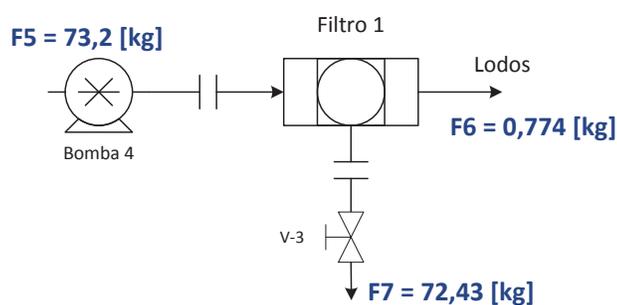


Figura 38. Balance de masa al filtro 1

Tabla 22. Balance de masa del filtro 1

Nomenclatura	Compuesto	Flujos de entrada	Flujos de salida
F5	Efluente	73,2 [kg]	-
F6	Lodos	-	0,774 [kg]
F7	Efluente 1	-	72,43 [kg]

### **8.2.3. Balance de masa al reactor**

En forma paralela al estanque donde ocurre el proceso de precipitación alcalina, en el reactor se llevan a cabo los procesos de digestión ácida y Electro-Fenton. Primero se debe agregar el ril ácido junto a los riles halogenados y no halogenados y así llevar a cabo el proceso de digestión ácida. Luego el proceso involucrado es el Electro-Fenton, en donde se debe dosificar peróxido de hidrógeno al reactor y se debe conectar la fuente de poder a las placas de fierro para obtener el ión ferroso del ánodo, con la finalidad de que la reacción fenton, ya descrita anteriormente, se efectúe y degrade la materia orgánica presente en el efluente. Finalmente en el reactor se efectúa el proceso de neutralización y floculación del efluente. Primero se abre la línea de recirculación del estanque 1 con el efluente alcalino para ingresar al reactor y efectuar la neutralización de éste. Debido a que el pH aún se encuentra en el rango de acidez se agrega cal hidratada para neutralizar el efluente y paralelamente llevar a cabo el proceso de floculación.

Es importante considerar que se agregará mayor cantidad de ácido en relación al trabajo experimental 3, esto implica, que es necesario añadir una mayor cantidad de cal hidratada para obtener un pH dentro del rango exigido por la normativa chilena. La cantidad necesaria de cal que se debe agregar se obtiene de las proporciones establecidas en el trabajo experimental 3. En la figura 39 se puede observar el balance de masa del reactor y en la tabla 23.

En el laboratorio de operaciones unitarias se encuentra un reactor en desuso el cual será descrito en el siguiente capítulo, pero cabe destacar una característica que tiene relación a la generación de calor durante las reacciones producidas, por lo que se puede utilizar la chaqueta de vapor que tiene este equipo como chaqueta de enfriamiento. Y así mantener la temperatura durante los procesos llevados a cabo en el reactor.

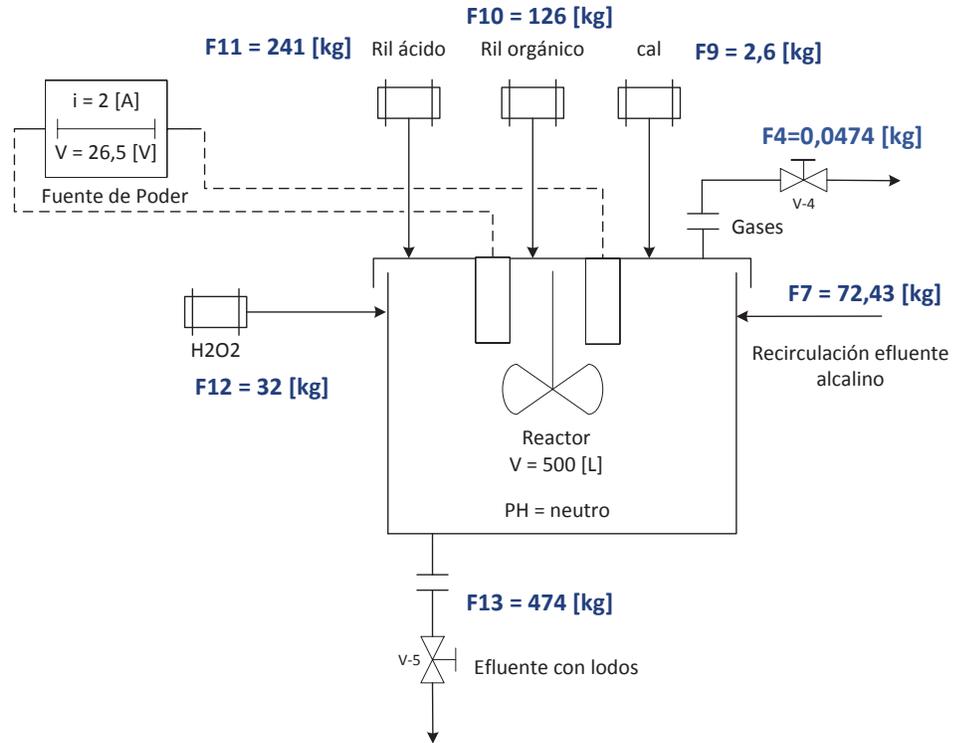


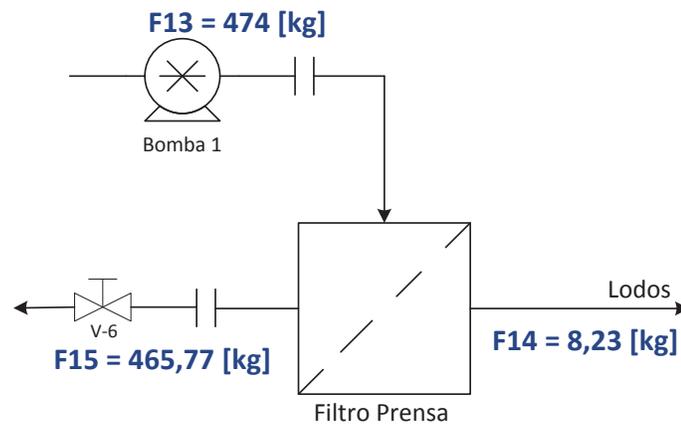
Figura 39. Balance de masa al reactor

Tabla 23. Balance de masa al reactor

Nomenclatura	Compuesto	Flujos de entrada	Flujos de salida
F12	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	32 [kg]	-
F11	Ril ácido	241 [kg]	-
F10	Ril orgánico	126 [kg]	-
F9	Ca(OH) <sub>2</sub>	2,6 [kg]	-
F7	Efluente 1	72,43 [kg]	-
F8	Gases 1	-	0,0474 [kg]
F13	Efluente 2	-	474 [kg]

## 8.2.4. Balance de masa al filtro prensa

Luego el flujo que sale del reactor, es decir, el F13 pasa al filtro prensa, en el cual se separa el lodo obtenido en los procesos anteriormente descritos y la línea con el efluente tratado continúa al siguiente proceso de adsorción con carbón activo. En la figura 40 y la tabla 24 se puede observar el balance de masa correspondiente al filtro prensa según las proporciones obtenidas en el trabajo experimental 3.



**Figura 40. Balance de masa al filtro prensa**

**Tabla 24. Balance de masa al filtro prensa**

Nomenclatura	Compuesto	Flujos de entrada	Flujos de salida
F13	Efluente 2	474 [kg]	-
F14	Lodos 1	-	8,23 [kg]
F15	Efluente 3	-	465,77 [kg]

### 8.2.5. Balance de masa al adsorbedor de carbón activo

A continuación, el efluente filtrado pasa al proceso de adsorción con carbón activo, para así disminuir los compuestos orgánicos presentes en éste y así obtener agua que cumple con los parámetros establecidos por la normativa chilena 609/98.

En la figura 41 y en la tabla 25 se puede observar el balance de masa correspondiente al adsorbedor de carbón activo. La cantidad adsorbida a escala real sería de 1 [kg].

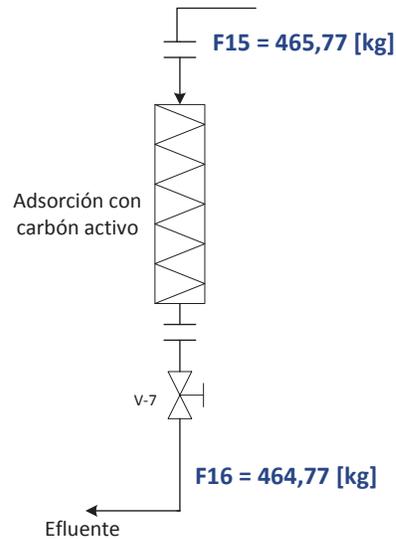


Figura 41. Balance de masa al adsorbedor de carbón activo

Tabla 25. Balance de masa al adsorbedor de carbón activo

Nomenclatura	Compuesto	Flujos de entrada	Flujos de salida
F15	Efluente 3	465,77 [kg]	-
F16	Efluente 4	-	464,77 [kg]

## 8.2.6. Balance de masa a los absorbedores de gases

Debido a que las reacciones involucradas como se describió anteriormente generan gases altamente tóxicos, fue necesario diseñar dos absorbedores de gases para lograr lavar éstos. El primer absorbedor de gases utiliza un líquido concentrado de NaOH para los gases tóxicos principalmente de origen ácido, luego estos gases pasan al absorbedor que tiene una solución concentrada de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Finalmente estos gases ya limpios son liberados a la atmósfera como se puede observar en la figura 42. En la tabla 26 se pueden observar los balances de masa correspondientes.

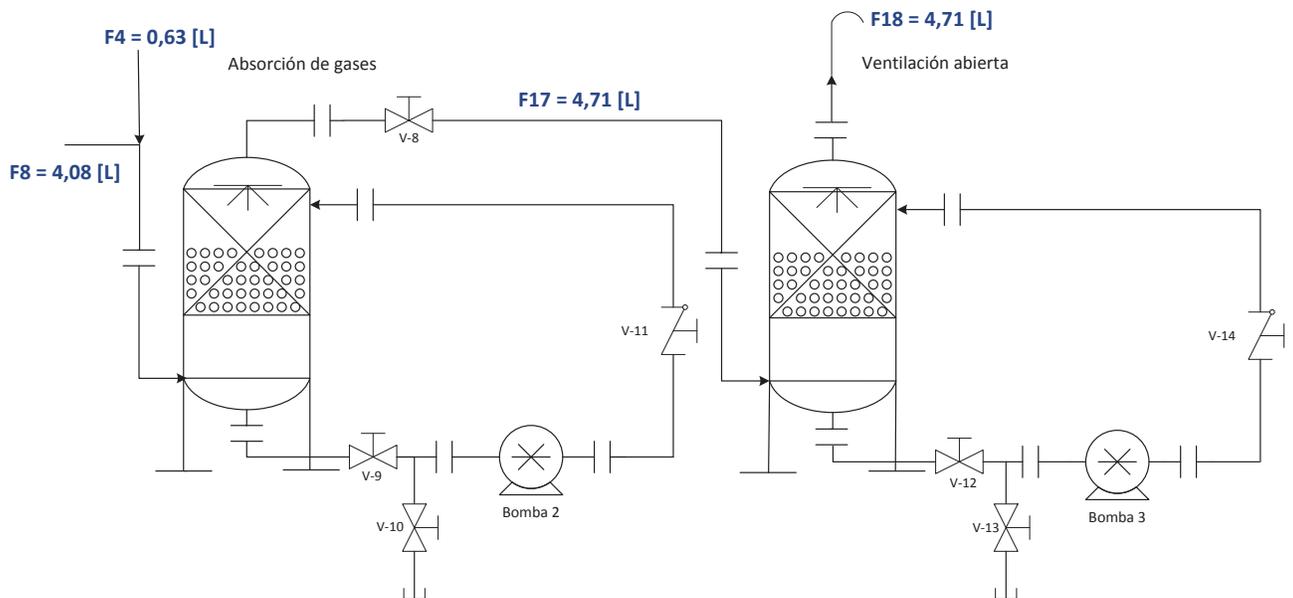


Figura 42. Representación de los absorbedores de gases

Tabla 26. Balance de masa a los absorbedores de gases

Nomenclatura	Compuesto	Flujos de entrada	Flujos de salida
F4	Gases	0,00732 [kg]	-
F8	Gases 1	0,0474 [kg]	-
F17	Gases 2	-	0,05472 [kg]
F18	Gases 3	-	0,05472 [kg]

Finalmente se determinaron los tiempos de proceso a escala real. A continuación se detallará el tiempo por proceso.

- a) Precipitación alcalina: 1 [h]
- b) Digestión ácida: 2 [h]
- c) Electro-fenton: 3 [h]
- d) Neutralización y floculación: 1 [h]
- e) Adsorción: 2 [h]
- f) Filtro prensa: 1 [h]

Es importante considerar que la precipitación alcalina se puede llevar a cabo en paralelo con el proceso de digestión ácida al igual que el proceso de filtración 1. Lo cual implica una disminución de los tiempos de procesos de un lote, por lo tanto, el tiempo estimativo que se demorará la planta en tratar un lote, considerando los caudales respectivos con los cuales se cotizaron las bombas es de 10 [h].

Al obtener las cantidades reales de ril tratado en un lote, se puede realizar el diseño de los equipos. Cabe destacar que el diseño de estos corresponde a un desarrollo de Ingeniería Básica. A continuación se realizará un análisis de rentabilidad del proyecto en comparación al costo anual que tiene tratar estos riles por una empresa externa, llamada Brisa, la cual se encuentra ubicada en Santiago, lo que implica un alto costo de transporte, entre otros.

# CAPITULO IX FACTIBILIDAD ECONÓMICA (EVALUACIÓN DE PROYECTO)

En el siguiente capítulo se analizará la rentabilidad del proyecto de instalar una planta de tratamiento de riles en el Campus Curauma, en donde se encontrará ubicado el laboratorio de operaciones unitarias de la escuela de Ingeniería Química. Hoy en día la universidad instaló una bodega en Curauma para mantener los residuos líquidos peligrosos de las distintas escuelas almacenadas en el mismo lugar de acopio.

A continuación se llevará a cabo un análisis de ingeniería básica del diseño de la planta de tratamiento de riles propuesta para la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

## 9.1. Costo de equipos para la estimación de la inversión

A través de las tablas utilizadas en la asignatura de Ingeniería Económica, específicamente, “methods for Estimating Capital Investment”, de Peter & Timmerhaus para plantas anexas. Se calculó el capital total de inversión, a través del método de los porcentajes del costo de equipos para una planta de proceso sólido-líquido.

Los equipos cotizados se pueden observar en el flowsheet (figura 36), de los cuales se determinó su valor según la capacidad de estos, determinada en los balances de masa realizados en el capítulo anterior y los flujos requeridos según el tiempo de funcionamiento de la planta.

[34] Varios de los equipos cotizados fueron obtenidos desde una página referencial donde se obtienen los precios de diferentes equipos, tales como, bombas, filtros, estanques, entre otros, pero estos costos son del año 2002, [35] por lo tanto, se aplicó el método de los costos indexados, ya que este es una herramienta para la estimación preliminar del costo de equipos. Se basa en tomar costos de equipos de un tiempo pasado y traerlos a valor presente.

Del libro “Peters & Timmershaus”, se obtiene la relación para traer al presente los costos de equipos o plantas conjuntamente con el escalamiento (o ajuste) por capacidad, expresada en la ecuación 9.1.

$$C_p = C_o \left( \frac{I_p}{I_o} \right) \cdot \left( \frac{Q_p}{Q_o} \right)^x \quad \text{Ecuación 9.1}$$

Donde:

$C_p$  = costo del equipo en valor presente

$C_o$  = costo del equipo en el pasado

$I_p$  = costo indexeado en el presente

$I_o$  = costo indexeado en el pasado

$Q_p$  = capacidad del equipo en el presente

$Q_o$  = capacidad del equipo en el pasado

$x$  = exponente que depende del equipo cotizado, este valor se puede obtener de las tablas del (Peters y Timmershaus)

En la siguiente tabla 27 se puede observar en detalle el valor de los equipos cotizados, los cuales cumplen con las condiciones establecidas según el proceso diseñado a escala real en el capítulo anterior.

**Tabla 27 Costo de los equipos de la planta de tratamiento de riles en USD**

Costo Equipos			
Equipo	Cantidad	Valor total FOB	Valor total CIF
Bombas	2	3.780	4.914
Fuente de poder	1	-	480
Reactor cerrado	1	-	2.880
Estanque stainless steel	1	920	1.196
Filtro de línea	1	190	247
Filtro prensa	1	-	4.820
Adsorbedor carbón activo	1	-	1.827
Absorbedor de gases	2	5.016	6.521
Costo Total CIF			22.885

A continuación se entregará una breve descripción de los equipos cotizados:

- 1) [36] Bombas: bomba neumática de doble diafragma marca Korax, tamaño 2" x 2" succión y descarga, capacidad de Flujo 0-570LPM (150 GPM). Máxima presión de descarga 7 Bar, material del cuerpo en ALUMINIO / diafragmas y esferas de TEFLON, Check tipo Esfera, paso de sólidos máximo 5 Milímetros. Especial para líquidos que contienen sólidos.
- 2) Fuente de poder: equipo utilizado en el laboratorio 1 de la Escuela de Ingeniería Química, ya que cumple con los requisitos de corriente y voltaje necesarios para llevar a cabo el proceso. El valor de éste se obtuvo del encargado de comprar los equipos en la EIQ.
- 3) Reactor cerrado: se considerará un costo de 2880 USD, debido a que se utilizará un reactor que se encuentra en desuso en el laboratorio de operaciones unitarias de la EIQ. Características: es de acero inoxidable con un agitador, tiene una capacidad de 500 [L] y una chaqueta de vapor. En la figura 43 se puede observar el reactor.



**Figura 43. Reactor disponible en el laboratorio de operaciones unitarias.**

- 4) [34] Estanque stainless steel: se cotizó un estanque cerrado con agitación de acero inoxidable, de capacidad 100 [L]. El valor de este equipo corresponde al del año 2002 y de mayor capacidad, por lo que, se utilizó la ecuación 21 de costos indexados, para obtener el valor del año 2015 y de la capacidad requerida.
- 5) Filtro de línea: se cotizó un filtro de línea de acero inoxidable de recambio, para un caudal que se encuentra en el rango entre [1,2 [L/min] – 1,4 [L/min]].
- 6) [37] Filtro prensa: se cotizó un filtro prensa con los requerimientos establecidos en el capítulo anterior en la página de la Empresa tecitec S.A. especializados en el tratamiento de efluentes. Debido a que el equipo cotizado tiene una capacidad mayor a la necesaria para tratar el efluente y sus lodos, se utilizó la ecuación de escalamiento por capacidad, para determinar el valor del filtro prensa que se requiere.
- 7) Adsorbedor de carbón activo: se cotizó una columna de absorción para una capacidad de 31 [kg] de carbón activo de lecho fijo de operación intermitente. Es importante considerar que el carbón activo se deberá cambiar 2 veces al año.
- 8) Absorbedores de gases: se cotizaron dos absorbedores de gases para el requerimiento descrito en el capítulo anterior. Las características del primer absorbedor de gases son: el material es acero inoxidable, el relleno de PVC y el líquido neutralizante es una solución concentrada de NaOH. El segundo absorbedor también es de material de acero inoxidable, el relleno de vidrio y el líquido neutralizante una solución concentrada de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

[35] Luego de obtener el costo total de los equipos se utilizó el “methods for estimating capital investment”, de Peters y Timmerhaus, para plantas anexas y de procesamiento sólido-fluido. Y así obtener el capital total de inversión. Primero se procedió a calcular el capital fijo directo de la inversión, como se puede observar en la tabla 28.

**Tabla 28. Capital fijo directo en USD**

Capital total de inversión /costos directos	% costo equipos	Estimación de datos
Costo equipos entregados	100	22.885
Instalación equipos	-	2.598
Instrumentación y controles instalado	8	1.831
Cañerías instaladas	31	7.094
Sistema eléctrico	10	2.289
Edificación	29	6.637
Mejoras de terreno	4	915
<b>Total capital fijo directo</b>		<b>44.249</b>

La instalación de equipos fue calculada utilizando la tabla 6-5 del “Peters y Timmerhaus”, la cual entrega el costo de instalación de algunos equipos como un porcentaje del costo de compra del equipo. Obteniendo los siguiente resultados que se pueden observar en la tabla 29.

**Tabla 29. Costo total de la instalación de equipos en USD**

Costo total instalación equipos		
Equipo	%	costo instalación
Bombas	20	983
Fuente de poder	Instalado	-
Reactor cerrado	Instalado	-
Estanque stainless steel	30	359
Filtro de línea	65	161
Filtro prensa	Instalado	-
Adsorbedor carbón activo	60	1.096
Absorbedor de gases	Instalados	-
Costo total instalación		2.598

En consiguiente se calcularon los costos indirectos, como se puede observar en la siguiente tabla 30.

**Tabla 30. Costos indirectos en USD**

Costos indirectos	% costo equipos	Estimación de datos
Ingeniería y supervisión	10	2.289
Gasto de construcción	8	1.831
Gastos Legales	1	229
Impuestos de contrato	1	229
Contingencias	5	1.144
Total costos indirectos planta		5.721

Finalmente se calcula el capital fijo de inversión, el cual es la suma del capital total fijo directo de inversión y el total de los costos indirectos de planta. Obteniendo este resultado se puede calcular el total capital de inversión, como se muestra en la siguiente tabla 31.

**Tabla 31. Total capital de inversión en USD**

Capital fijo de inversión		49.971
Capital de trabajo	15% TCI	8.818
<b>TOTAL CAPITAL INVERSION (TCI)</b>		<b>58.789</b>

## 9.2. Costo total del producto

Se procede a estimar el costo total del producto utilizando la tabla 6-18 del “Peters y Timmerhaus”.

Respecto a los costos directos de calculó según las cantidades de materias primas obtenidas en el balance de masa, el gasto involucrado en la adquisición de estas durante un año.

Las materias primas cotizadas son: cal hidratada 50,4 [kg/año], H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 15 p/v 576 [kg/año], placas de fierro, las cuales se pueden conseguir como chatarra, por lo que se consideró costo 0, carbón activo 62 [kg/año] y los riles ácidos, alcalinos, orgánicos y con metales pesados los cuales al ser desechos tienen costo 0.

La mano de obra se considerará como un gasto mínimo, debido a que la planta trabajará 2 veces al mes, por lo tanto, como deben trabajar 2 operarios se capacitarán 2 trabajadores pertenecientes a la PUCV para que estén a cargo de manejar la planta de tratamientos de riles.

También se procedió a calcular el suministro de la planta según la tabla de porcentajes de “Peters y Timmerhaus” y el gasto energético de los equipos que consumen energía.

En la siguientes tablas 32 y 33 se puede observar en detalle el cálculo del costo total del producto.

**Tabla 32. Costo energético de equipos en USD en un año**

Equipos que requieren energía	
Suministro	86
Costo eléctrico	336
<b>Total</b>	<b>422</b>

**Tabla 33. Costo total del Producto en USD en un año**

Costo Total del Producto	
MP	583
Mano de obra	864
Costo eléctrico	422
CTP	1.869

### 9.3. Depreciación y financiamiento del proyecto

Luego se calculó la depreciación de los activos fijos tangibles, asumiendo una depreciación lineal de estos en 15 años y sin considerar los terrenos, ya que estos no son depreciables. Obteniendo los resultados que muestra la tabla 34.

**Tabla 34. Depreciación lineal de los equipos en USD**

Depreciación lineal	
n	15
Costo equipos	22.885
Depreciación	763
Valor salvamento	12.587

Posteriormente se determinó que el 70 % del total capital de inversión será financiada en 15 años sin considerar años de gracia con una tasa de interés 9 % sobre la deuda impaga y con amortizaciones iguales como se puede observar en la siguiente tablas 35 y 36.

**Tabla 35. Financiamiento del proyecto en USD**

Financiamiento	
Interés	0,09
Venta Activo	44.092
Préstamo	41.152
Amortiguación	2.743

**Tabla 36. Continuación tabla de financiamiento en USD**

Año	deuda	amortiguación	interés	cuota
0	41.152	-	-	-
1	38.409	2.743	3.704	6.447
2	35.665	2.743	3.457	6.200
3	32.922	2.743	3.210	5.953
4	30.178	2.743	2.963	5.706
5	27.435	2.743	2.716	5.460
6	24.691	2.743	2.469	5.213
7	21.948	2.743	2.222	4.966
8	19.204	2.743	1.975	4.719
9	16.461	2.743	1.728	4.472
10	13.717	2.743	1.481	4.225
11	10.974	2.743	1.235	3.978
12	8.230	2.743	988	3.731
13	5.487	2.743	741	3.484
14	2.743	2.743	494	3.237
15	-	2.743	247	2.990

#### **9.4. Costos de la empresa externa que trata los riles**

El último análisis realizado antes de calcular el flujo de caja neto, es el ingreso que se obtendrá. En este caso el ingreso del proyecto es el ahorro que la PUCV tendrá, al no requerir el servicio externo que hoy en día utiliza para tratar los riles generados.

La Empresa Brisa, que se encarga de la gestión de los residuos líquidos peligrosos, cobra 5 [UF/m<sup>3</sup> de ril]. Sin considerar el costo de traslado cada trimestre desde Valparaíso hasta Santiago para tratar estos residuos, por lo tanto, debido a que la UF varía anualmente, siendo su aumento aproximado de \$1000, que la cantidad de riles generados el año 2013, fue de 8 [ton/año], el cual va aumentando debido a que cada año se generan más residuos líquidos por tema de investigaciones a empresas externas que realizan por ejemplo la Escuela de Ingeniería Química y la variación del precio de la bencina. Se calculó el ingreso variable según la siguiente ecuación 9.2, considerando el ahorro o ingreso del año 1 como  $I_1$ :

$$I_1 + I_1 \cdot 0,02 + I_1 \cdot 0,00035 \qquad \text{Ecuación 9.2}$$

## 9.5. Análisis de rentabilidad

[35] Finalmente se procedió a realizar el flujo de caja neto para determinar la factibilidad del proyecto, es decir, si es rentable o no instalar una planta de tratamientos de riles en las inmediaciones del campus Curauma, donde se encuentra la bodega de desechos líquidos peligrosos del centro de estudio y el laboratorio de operaciones unitarias de la Escuela de Ingeniería Química. Por lo cual se utilizaron los siguientes indicadores para realizar el análisis:

TMAR: la TMAR o tasa mínima aceptable de rendimiento, también llamada TIMA, tasa de interés mínima aceptable o TREMA, tasa de rendimiento mínimo aceptable es la tasa que representa una medida de rentabilidad, la mínima que se le exigirá al proyecto de tal manera que permita cubrir:

- a) La totalidad de la inversión inicial
- b) Los egresos de operación
- c) Los intereses que deberán pagarse por aquella parte de la inversión financiada con capital ajeno a los inversionistas del proyecto
- d) Los impuestos
- e) La rentabilidad que el inversionista exige a su propio capital invertido

EL TMAR utilizado en el análisis de rentabilidad del proyecto es de 10 %.

VAN: El valor actual neto, también conocido como valor actualizado neto o valor presente neto (en inglés net present value), cuyo acrónimo es VAN (en inglés, NPV), es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.

TIR: Es el crédito de descuento que iguala el valor actual de los egresos con el valor futuro de los ingresos previstos, se utiliza para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión. Para ello, la TIR se compara con una tasa mínima o tasa de corte. Si la tasa de rendimiento del proyecto - expresada por la TIR- supera a la tasa de corte, se le acepta; en caso contrario, se le rechaza.

A continuación, en la tabla 31 y 32 se puede observar el flujo de caja neto del proyecto en 15 años.

**Tabla 37. Flujo de caja neto del proyecto**

Año	0	1	2	3	4	5	6	7
Ingreso por venta (+)		4.964	5.237	5.344	5.452	5.563	5.677	5.792
Costo del producto (-)		1.869	1.869	1.869	1.869	1.869	1.869	1.869
Utilidad operacional (=)		3.095	3.368	3.475	3.584	3.695	3.808	3.923
Depreciación (-)		763	763	763	763	763	763	763
Interés (-)		3.704	3.457	3.210	2.963	2.716	2.469	2.222
Venta activo (+)								
Pérdida del ejercicio anterior (-)								
Utilidad antes del impuesto (=)		- 1.371	- 851	- 498	- 142	216	576	938
Impuesto (-)		- 233	- 145	- 85	- 24	37	98	159
Utilidad neta (=)		- 1.371	- 707	- 413	- 118	179	478	779
Depreciación (+)		763	763	763	763	763	763	763
Valor de salvamento (+)								
Pérdida del ejercicio anterior (+)								
Amortización (-)		2.743	2.743	2.743	2.743	2.743	2.743	2.743
Préstamo (+)	41.152							
Capital fijo (-)	49.971							
Capital de trabajo (-)/(+)	8.818							
Flujo de caja neto (=)	- 17.637	- 3.352	- 2.687	- 2.394	- 2.099	- 1.802	- 1.503	- 1.202
Valor Presente	- 17.637	- 3.047	- 2.221	- 1.799	- 1.433	- 1.119	- 848	- 617

**Tabla 38. Continuación del flujo de caja del proyecto**

Año	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingreso por venta (+)	5.910	6.030	6.153	6.278	6.406	6.536	6.669	6.805
Costo del producto (-)	1.869	1.869	1.869	1.869	1.869	1.869	1.869	1.869
Utilidad operacional (=)	4.041	4.161	4.284	4.409	4.537	4.667	4.800	4.936
Depreciación (-)	763	763	763	763	763	763	763	763
Interés (-)	1.975	1.728	1.481	1.235	988	741	494	247
Venta activo (+)								44.092
Pérdida del ejercicio anterior (-)								
Utilidad antes del impuesto (=)	1.303	1.670	2.040	2.412	2.787	3.164	3.544	48.018
Impuesto (-)	222	284	347	410	474	538	602	8.163
Utilidad neta (=)	1.081	1.386	1.693	2.002	2.313	2.626	2.941	39.855
Depreciación (+)	763	763	763	763	763	763	763	763
Valor de salvamento (+)								12.587
Pérdida del ejercicio anterior (+)								
Amortización (-)	2.743	2.743	2.743	2.743	2.743	2.743	2.743	2.743
Préstamo (+)								
Capital fijo (-)								
Capital de trabajo (-)/(+)								8.818
Flujo de caja neto (=)	- 899	- 594	- 288	21	332	645	961	59.280
Valor Presente	- 419	- 252	- 111	7	106	187	253	14.191

Finalmente se calcularon los indicadores para analizar la rentabilidad del proyecto, que se muestran en la siguiente tabla 39:

**Tabla 39. Resultados de los indicadores**

TMAR	0,1			
VAN	- 14.759	<	0	Implica que el proyecto no es rentable
TIR	0,08558559	<	TMAR	Implica que el proyecto no es rentable

Debido a que el proyecto no es rentable se procedió a realizar un análisis de sensibilidad, para determinar de qué manera se altera la decisión económica con la variación de las variables o parámetros considerados en el análisis económico.

## 9.6. Análisis de sensibilidad

[35] El análisis de sensibilidad de los proyectos de inversión tienen por finalidad mostrar los efectos que tendría sobre la rentabilidad una variación o cambio en el valor de una o más de las variables de costo o de ingreso que inciden en el proyecto (por ejemplo, la tasa de interés, el volumen y/o el precio de ventas, el costo de las materias primas, el monto del capital, entre otros).

En los análisis de sensibilidad realizados se consideraron valores mínimos relacionados al costo del reactor cerrado en desuso ubicado en el laboratorio de operaciones unitarias de la Escuela de Ingeniería Química y un valor mínimo para los costos involucrados en la mano de obra.

En el primer análisis de sensibilidad realizado, se hizo variar el ingreso o ahorro, pero es importante recalcar que no se varía directamente, sino los factores que afectan el aumento del costo que la empresa Brisa cobra por tratar los riles y el transporte de estos desde Valparaíso hacia Santiago. Ya que estos factores dependen de la UF, la cual varía cada año aumentando alrededor de \$1000, el valor de la bencina, el costo de las materias primas que debe utilizar la empresa para tratar los riles, la electricidad, el costo del uso de agua, la mano de obra, entre otros factores. La inflación también es un factor influyente en el aumento del costo dado por la empresa externa. También es importante considerar el aumento de la cantidad de riles generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, ya que en los últimos años ha aumentado las investigaciones relacionadas con el área de la minería, aumentando así la cantidad de desechos líquidos peligrosos con contenido de metales pesados, los cuales implican un tratamiento cuyo costo es mayor.

En base a lo descrito, se fue variando los factores que afectan el ahorro o ingreso del primer año, el cual va aumentando según la ecuación 9.2. Obteniendo una variación de los indicadores VAN y TIR como se puede observar en la siguiente tabla 40.

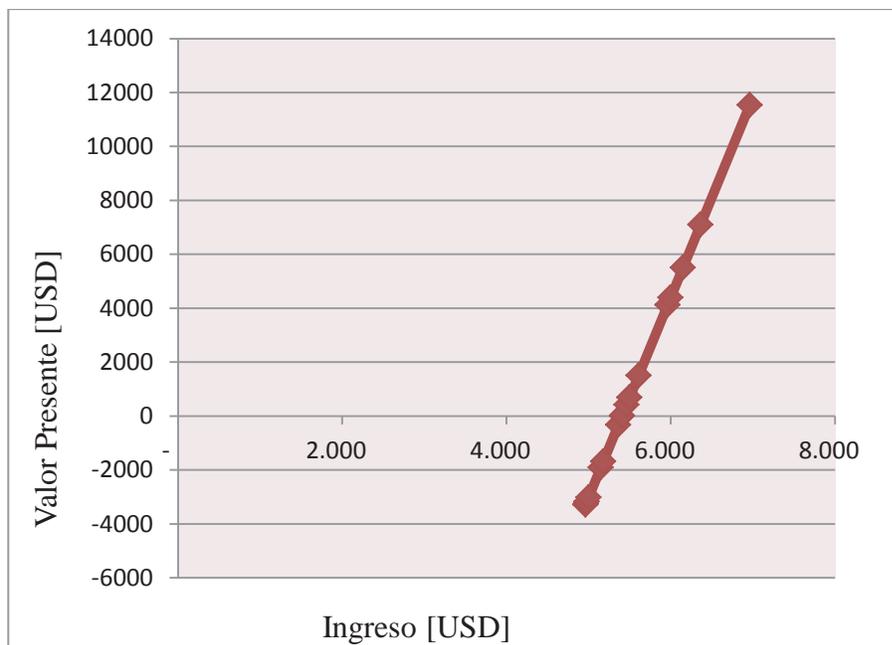
**Tabla 40. Análisis de sensibilidad variando el ingreso**

Año 1		Tanteo					
Ingreso [USD]		VAN [USD]	TIR	TIR %			
4.964	-	3.289	0,08558	8,558	<	TMAR	No rentable
4.970	-	3.245	0,08604	8,604	<	TMAR	No rentable
4.980	-	3.171	0,08635	8,635	<	TMAR	No rentable
5.000	-	3.022	0,08699	8,699	<	TMAR	No rentable
5.150	-	1.910	0,09172	9,172	<	TMAR	No rentable
5.180	-	1.688	0,09268	9,268	<	TMAR	No rentable
5.364	-	324	0,09858	9,858	<	TMAR	No rentable
5.408		0	0,09999	9,999	=	TMAR	
5.410		17	0,10007	10,007	>	TMAR	Rentable
5.464		418	0,10182	10,182	>	TMAR	Rentable
5.500		685	0,10300	10,300	>	TMAR	Rentable
5.610		1.500	0,10661	10,661	>	TMAR	Rentable
5.964		4.125	0,11842	11,842	>	TMAR	Rentable
6.000		4.392	0,1200	12,000	>	TMAR	Rentable
6.150		5.504	0,12476	12,476	>	TMAR	Rentable
6.364		7.090	0,12550	12,550	>	TMAR	Rentable
6.964		11.539	0,14400	14,400	>	TMAR	Rentable

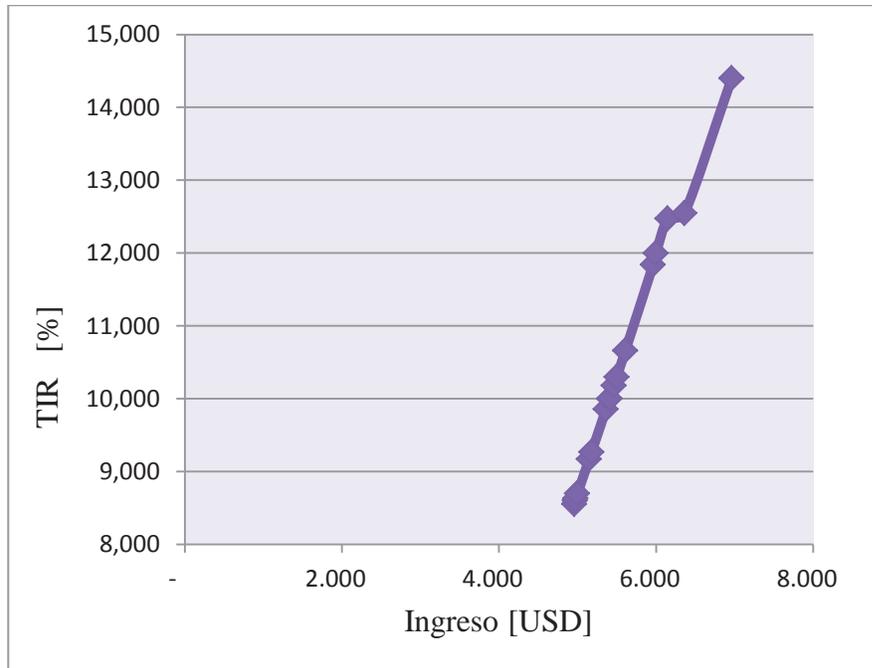
Respecto a los resultados obtenidos, se puede apreciar que el proyecto empieza a ser rentable si es que en el año 1 el costo de la empresa Brisa fuera de 5410 USD. Donde el VAN es positivo, de 17 USD y el TIR es de 10,007 % tan sólo un poco superior al TMAR, el cual es de 10 %. Desde ahí en adelante el aumento del costo de la empresa en el año 1, implica una mayor rentabilidad del proyecto, debido a que representa el ahorro que la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, tendría al tener una planta de tratamiento de riles. El cambio de ésta variable tiene una repercusión importante en el análisis económico, debido a que una variación pequeña en el ingreso o ahorro afecta de gran manera la sensibilidad y rentabilidad del proyecto. La última variación del costo de la empresa en el primer año realizada en el análisis de sensibilidad fue de 6964 USD, obteniendo un VAN de 11539 USD y un TIR de 14,4 %, siendo superior al TMAR, el cual es de 10 %. A través de estos indicadores antes descritos,

se determina que el proyecto es rentable bajo ciertas condiciones y variaciones de factores que afectan el costo que implica contratar una empresa externa para que se encargue del tratamiento de los riles generados por la PUCV.

En las figuras 44 y 45 se puede observar el costo mínimo para tratar los riles que la empresa Brisa debe tener con la Universidad, para que el proyecto sea rentable. Es decir, cuando el VAN es igual a cero y el TIR se iguala con el TMAR.



**Figura 44. Variación del indicador VAN respecto a la variación del ingreso**



**Figura 45. Variación del indicador TIR respecto a la variación del ingreso**

En el segundo análisis de sensibilidad se hizo variar el costo de los equipos porcentualmente. Es importante analizar esta variable debido a que afecta bastante la rentabilidad del proyecto, ya que la cotización realizada representa valores estimativos de los equipos, además que es posible cotizar nuevamente en otras empresas donde el costo de estos sea menor y en consecuencia el total capital de inversión disminuya considerablemente.

En la siguiente tabla 41 se puede observar la disminución porcentual del costo de los equipos, obteniendo una variación de los indicadores VAN y TIR, los cuales determinan la rentabilidad del proyecto.

**Tabla 41. Análisis de sensibilidad variando el costo de los equipos**

Tanteo								
Disminución Costo equipos (porcentual)		Costo Equipos [USD]	VAN [USD]	TIR	TIR %			
0	%	20.005	- 3.289	0,08558	8,558	<	TMAR	No rentable
4	%	19.205	- 2.036	0,09086	9,086	<	TMAR	No rentable
8	%	8.405	- 782	0,09633	9,633	<	TMAR	No rentable
10	%	18.005	- 155	0,09925	9,925	<	TMAR	No rentable
10,496	%	17.905	0	0,09990	9,990	=	TMAR	
12	%	17.605	471	0,10233	10,233	>	TMAR	Rentable
14	%	17.204	1.098	0,10557	10,557	>	TMAR	Rentable
16	%	16.804	1.725	0,10897	10,897	>	TMAR	Rentable
18	%	16.404	2.352	0,11255	11,255	>	TMAR	Rentable
20	%	16.004	2.979	0,11634	11,634	>	TMAR	Rentable
22	%	15.604	3.605	0,12034	12,034	>	TMAR	Rentable

Respecto a los resultados obtenidos se puede observar en la tabla 35, que el proyecto empieza a ser rentable si es que el costo de los equipos disminuye en un 12%, donde el VAN comienza a ser positivo, de 471 USD y el TIR de 10,23% tan sólo un poco superior al TMAR, el cual es de 10%. Desde ahí en adelante el proyecto es rentable. Se analizó hasta un porcentaje de disminución del costo de los equipos del 22% obteniendo un VAN de 3605 USD y un TIR de 12,03%, el cual es mayor que el TMAR, lo que indica que el proyecto es rentable.

En la figura 46 y 47 se puede observar el costo mínimo de los equipos, para que el proyecto sea rentable. Es decir, cuando el VAN es igual a cero y el TIR se iguala con el TMAR.

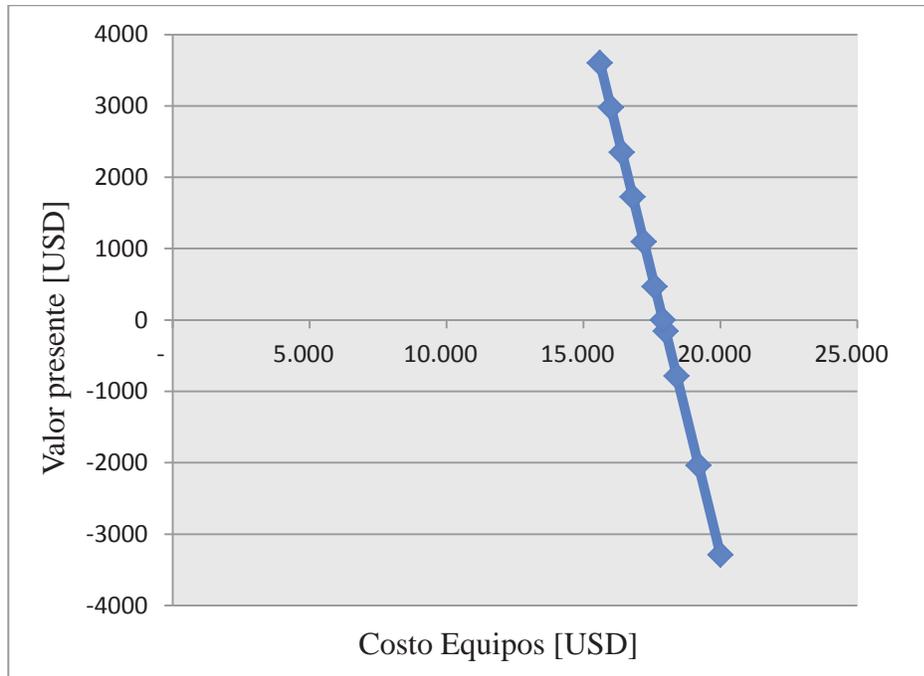


Figura 46. Variación del indicador VAN respecto a la disminución % del costo de los equipos

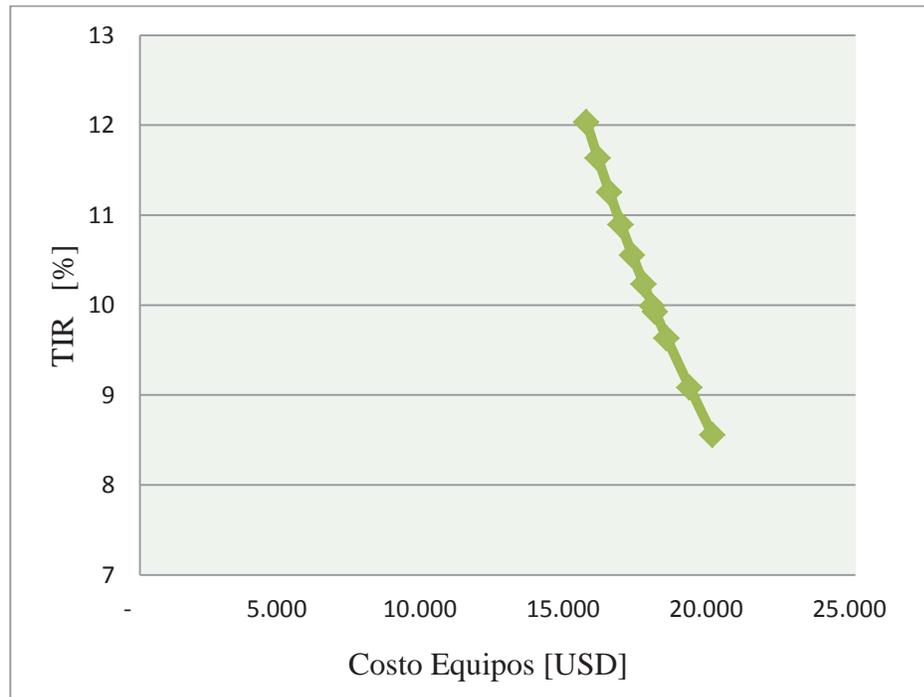


Figura 47. Variación del indicador TIR respecto a la disminución % del costo de los equipos

## 9.7 Conclusión

Finalmente, luego de determinar el total costo de inversión, los ingresos, los egresos, entre otros, para poder calcular el flujo neto del proyecto en 15 años. Se calculó los indicadores VAN y TIR para decidir si el proyecto es rentable o no. Llegando a la conclusión de que la instalación de una planta de tratamiento de riles no es rentable, debido a que el VAN (método del valor presente) dio un valor negativo, es decir, el proyecto no aporta ganancias y es favorable seguir contratando los servicios externos de la empresa Brisa para que trate los residuos líquidos peligrosos. Respecto al TIR el cual dio un valor positivo, este es menor al TMAR lo que indica que el proyecto no es rentable, porque no supera la tasa mínima aceptable de rendimiento.

Luego se analizaron las variables que son sensibles al cambio y que afectan la rentabilidad del proyecto, obteniendo que un aumento del 8,9% en los costos de la empresa externa que se encarga de tratar los riles generados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, implica que el valor presente del flujo de caja neto sea 0 USD, es decir, es el ingreso mínimo que debe tener nuestro proyecto en el año 1 para que sea rentable. En el segundo análisis de sensibilidad se obtuvo que una disminución del 10,4% en el costo de los equipos, implica que el valor presente del flujo de caja neto sea 0 USD, es decir, es el costo mínimo de los equipos para que el proyecto sea rentable.

También es importante considerar que la planta propuesta funcionará pocas veces al año por lo cual se podría prestar servicios a otras Universidades, como por ejemplo a la Universidad de Valparaíso, Universidad Santa María, Universidad de Playa Ancha, entre otras. Obteniendo un mayor ingreso.

## CAPITULO X CONCLUSIONES FINALES

El estudio realizado sobre la reacción Fenton y la aplicación electroquímica a ésta, demostró que la cantidad de dinero por m<sup>3</sup> de ril tratado es menor en el proceso Electro-Fenton. En base a este estudio se procedió a utilizar este proceso en los trabajos experimentales llevados a cabo en el laboratorio 1 de la Escuela de Ingeniería Química.

En los desarrollos experimentales sobre el proceso avanzado de oxidación Electro-Fenton se determinó que este proceso tiene poca selectividad para oxidar, esto se ve reflejado en los porcentajes de degradación de compuestos orgánicos obtenidos en los procesos experimentales 2 y 3, los cuales fueron de 95,11% y 98,28% respectivamente. Lo cual determina la efectividad de utilizar este proceso en el tratamiento de residuos líquidos peligrosos.

En el proceso experimental 3 se logró diseñar un proceso para el tratamiento de riles generados por la PUCV, aplicando los procesos de precipitación alcalina, digestión ácida, Electro-Fenton, neutralización y floculación, los cuales fueron estudiados previamente para determinar los parámetros de dosificaciones adecuadas, los tiempos de reacción, entre otras. Se logró así obtener un proceso para el tratamiento de riles de la universidad que cumple con la normativa chilena 609/98.

Posteriormente, se realizó un estudio de factibilidad económica para determinar si era rentable instalar una planta de tratamientos de riles en el campus de la PUCV, ubicado en Curauma y se comparó con el costo que incurre el centro de estudios actualmente, siendo este el de contratar una empresa que dispone de estos residuos líquidos peligrosos, la cual está ubicada en Santiago. En base a lo descrito se obtuvo que la hipótesis planteada: “Instalación de una planta de tratamientos de riles de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso que sea económicamente más factible en comparación con la tercerización a empresa externa y que cumpla con la normativa chilena 609/98” es rechazada, debido a que el proyecto no es rentable, lo cual se determinó a través de diferentes indicadores económicos como el VAN y el TIR.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para determinar los factores que influyen en la rentabilidad del proyecto planteado. En él se obtuvo que nuestro proyecto es bastante sensible a ciertos cambios, estos son: el aumento de los costos establecidos por la empresa externa y la disminución de los costos de los equipos. Esto implica que una pequeña variación de éstas, determina que el proyecto si sea rentable para la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] “*Water Treatment Handbook, Degrémont*”, 6a Edición. Editorial Lavoisier Publishing, Paris (1991).
- [2] AGUAMARKET. *Productos y Servicios para la Industria del Agua en Latino América*. [en línea] [Consulta: 25 de junio 2014]. Disponible en web: <[http://www.aguamarket.com/sql/temas\\_interes/028.asp](http://www.aguamarket.com/sql/temas_interes/028.asp)>
- [3] Gavilán García, Irma. *Guía técnica de acción para residuos químicos* [en línea]. Universidad Nacional autónoma de México, 2012. [Consulta: 8 abril 2014]. Disponible en web: <<http://www.fciencias.unam.mx/nosotros/comision/Gu%C3%ADa%20t%C3%A9cnica%20de%20acci%C3%B3n%20para%20residuos%20qu%C3%ADmicos.pdf>>
- [4] Ruben Sette, Ramalho (ed.). *Introduction to Wasterwater Treatment Processes, Second Edition*. Academic Press, Inc (London) LTD, 2003. p. 91 – 100.
- [5] Herrera, Zeppelin, Leandro. *Procesos de neutralización de residuos líquidos industriales (o de abatimiento en riles)*. [en línea]. Universidad de Chile, 2008. [Consulta: 8 abril 2014]. Disponible en web: <[http://www.cec.uchile.cl/~leherrer/iq651/Apunte1/Fisicoqapu01.htm#\\_Toc493666881](http://www.cec.uchile.cl/~leherrer/iq651/Apunte1/Fisicoqapu01.htm#_Toc493666881)>
- [6] Lacorte, S., Latorre A., Barceló D., Rigor A., Malmqvist, A. and Welander, T. *Organic compounds in paper mill process water and effluents. Trends in Analytical Chemistry*. 2003. 22 (10), 725-736.
- [7] Cárdenas, Casas, Francisco. *Caracterización de los sistemas de tratamientos de riles en la industria lechera y propuestas de mejora*. [en línea]. Universidad Austral de Chile, 2009. [Consulta: 15 abril 2014]. Disponible en web: <<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/fac335c/doc/fac335c.pdf>>
- [8] National Academy of Sciences. *Coagulación, floculación, sedimentaciones convencionales*. [en línea]. Global Health and Education Foundation, 2007. [Consulta: 15 abril 2014]. Disponible en web: <<http://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation-technologies.html#tech3>>
- [9] Universidad de Castilla, La Mancha. *Tema 5, coagulación y floculación*. 2010. [en línea]. [Consulta 15 abril 2014]. Disponible en web: <[http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis\\_procesos/tema5.pdf](http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf)>

- [10] Alvarado, Avila, Karolina. *Propuesta para el mejoramiento del sistema de tratamiento de residuos industriales líquidos de Viña San Pedro S.A., planta molina*. [en línea]. Universidad de Talca, 2006. [Consulta: 15 de abril 2014]. Disponible en web: <<http://www.tesischilenas.cl/index.php/record/view/107615>>
- [11] LENNTECH. *Water Treatment Solutions*. [en línea]. [Consulta: 25 de junio 2014]. Disponible en web: <<http://www.lenntech.es/adsorcion-carbon-activado.htm>>
- [12] Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering*. Tercera edición, 1991. p. 317
- [13] AIR LIQUIDE. *Enciclopedia de los gases*. [en línea]. [Consulta: 30 de junio 2014]. Disponible en web: <<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asplanguageid&GasID=44&CountryID=19>>
- [14] Domènech, Xavier. *Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminante*. [en línea]. Wilson F. Jardim y Marta I. Litter. [Consulta: 22 de marzo 2013]. Disponible en web: <<http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/cyted/06cap01.pdf>>
- [15] Rodríguez, Fernández-Alba, Antonio. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. [en línea]. Universidad de Alcalá del círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME), 2006. [Consulta: 8 de mayo 2014]. Disponible en web: <[http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2\\_tratamientos\\_avanzados\\_de\\_aguas\\_residuales\\_industriales.pdf](http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf)>
- [16] Trujillo D., Font X. y Sánchez A. *Use of Fenton reaction for the treatment of leachate from composting of different wastes*. J. Hazard. Mater. 2006. 138, 201-204.
- [17] Barbusiński K. Henry John Horstman. *Fenton-short biography and brief history of fenton reagent discovery*. Metrología. 2009; 14: 101-105
- [18] Méndez, Novelo, Roger. *Determinación de la dosis óptima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-Adsorción*. [en línea]. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, 2010. [Consulta: 8 de mayo de 2014]. Disponible en web: <<http://scielo.unam.mx/pdf/rica/v26n3/v26n3a4.pdf>>
- [19] Priambodo Ricky, Shih Yu-Jen, Huang Yu-Jen y Huang Yao-hui. *Treatment of real wastewater using semi batch (Photo)-Electro-Fenton method*. [en línea]. National Cheng Kung University, 2011. [Consulta: 8 de mayo 2014]. Disponible en web: <<http://ser.cienve.org.tw/download/21-6/21-6-8.pdf>>

- [20] Instituto de Salud Pública, Ministerio de Salud, Chile. *Servicios de laboratorios*. [en línea]. [Consulta: 8 de mayo 2014]. Disponible en web: <[http://www.ispch.cl/lab\\_amb/serv\\_lab/aguas\\_rieles.html](http://www.ispch.cl/lab_amb/serv_lab/aguas_rieles.html)>
- [21] Superintendencia de Servicios Sanitarios, Gobierno de Chile. *Residuos líquidos industriales (RILES)*. [en línea]. [Consulta: 1 de octubre 2014]. Disponible en web: <<http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-4156.html>>
- [22] Chile, Decreto Norma; 609/98. *Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado*, 7 de mayo de 1998. p. 35.
- [23] Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. *Reporte de Sostenibilidad*. Coordinación General de Comunicación Institucional, 2013. p. 155.
- [24] Guarín, Oscar. *Manejo de residuos líquidos peligrosos en la Universidad de Santander*. 2010. [en línea]. [Consulta: 10 de julio 2014]. Disponible en web: <[http://www.udesverde.com/PDF/Manejo\\_Residuos\\_Liquidos.pdf](http://www.udesverde.com/PDF/Manejo_Residuos_Liquidos.pdf)>
- [25] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente, España. *Compuestos orgánicos halogenados (AOX)*. [en línea]. [Consulta: 5 de agosto 2014]. Disponible en web: <<http://www.prtr-es.es/Compuestos-Organicos-Halogenados-AOX,15627,11,2007.html>>
- [26] CABIMER. *Clasificación y Gestión de residuos tóxicos y peligrosos*. [en línea]. [Consulta: 1 de agosto 2014]. Disponible en web: <[http://www.cabimer.es/web/docs/isotopos/gestion\\_de\\_residuos.pdf](http://www.cabimer.es/web/docs/isotopos/gestion_de_residuos.pdf)>
- [27] Universidad de Málaga. *Clasificación de residuos peligrosos*. [en línea]. Servicio de prevención de riesgos laborales (Sepruma), 2012. [Consulta: 25 de agosto 2014]. Disponible en web: <[http://www.uma.es/publicadores/prevencion/wwwuma/Clasificacion\\_residuos\\_2012.pdf](http://www.uma.es/publicadores/prevencion/wwwuma/Clasificacion_residuos_2012.pdf)>
- [28] Residuos de disolventes en el Laboratorio, Eliminación y/o Reciclado. [en línea]. [Consulta: 3 septiembre 2014]. Disponible en web: <[http://www.oc-praktikum.de/nop/es/articulos/pdf/SolventRecyclingDisposal\\_es.pdf](http://www.oc-praktikum.de/nop/es/articulos/pdf/SolventRecyclingDisposal_es.pdf)>
- [29] M. del Río Anaya, J. A. Luna Encinas. *Determinación de metales pesados en agua residual en proceso de Galvanoplastia*. [en línea]. Universidad de Guadalajara, 2007. [Consulta: 9 de septiembre 2014]. Disponible en web: <<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=1533>>

- [30] Mejía, Restrepo, Ana; Arango, Álvaro; Garcés, Luis. *Electrocoagulation: Challenges and opportunities in water treatment*. [en línea]. Universidad Pontificia Bolivariana, 2006. [Consulta: 10 de septiembre 2014]. Disponible en web: <[http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol1n2/pl\\_v1n2\\_58-77\\_electrocoagulacion.pdf](http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol1n2/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf)>
- [31] CONAFE. [en línea]. Publicación de tarifas de Suministro Eléctrico Compañía Nacional de Fuerza Eléctrica S.A, 2013. [Consulta: 12 de julio 2013]. Disponible en web: <[http://www.conafe.cl/mercadoelectrico/Documents/D%C2%B0IT\\_2013\\_Tarifas%20Suministro\\_Publicaci%C3%B3n%20CONAFE\\_2013-05-01.pdf](http://www.conafe.cl/mercadoelectrico/Documents/D%C2%B0IT_2013_Tarifas%20Suministro_Publicaci%C3%B3n%20CONAFE_2013-05-01.pdf)>
- [32] Universidad de Chile. Valencia, *Oxidación-Reducción, Balance de reacciones, Pesos equivalentes*. [en línea]. [Consulta: 8 de julio 2014]. Disponible en web: <[http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias\\_quimicas\\_y\\_farmaceuticas/apquim-gral1d/c10.html](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/apquim-gral1d/c10.html)>
- [33] Valencia, Asdrúbal. *Tecnología del tratamiento térmico de los metales*. [en línea] Ed. Universidad de Antioquia, 1992. [Consulta: 8 de julio 2014]. Disponible en web: <<http://www.tratar.com.co/descargas/acero.pdf>>
- [34] Cotización de equipos. [en línea]. [Consulta: 8 de enero 2015]. Disponible en web: <<http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>>
- [35] Peter y Timmershaus. "Plant dising and economics for chemical engineers. Editorial advisory board." Editorial international 1991.
- [36] BYMISA. *Bombas y mantenimiento industrial*. [en línea]. [Consulta: 10 de enero 2015]. Disponible en web:< [ventas@bymisa.mx](mailto:ventas@bymisa.mx)>
- [37] TECITEC. *Filtración y Tratamiento de efluentes*. [en línea]. [Consulta: 10 de enero 2015]. Disponible en web: <<http://www.tecitec.com.br/>>