



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL RECICLAJE DE NEUMÁTICOS
MINEROS FUERA DE USO MEDIANTE OZONO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

CRISTIAN ANTONIO VILLAGRA SAN MARTÍN

PROFESOR GUÍA

Dr. MANUEL VIERA FLORES.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

Dr. DIÓGENES HERNÁNDEZ ESPINOZA.

Mg. KENJI NAITO CHIANG.

CURICÓ - CHILE

2021

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo constante de mis padres, Hugo Villagra y Elina San Martín, quienes me enseñaron el valor del esfuerzo y trabajo constante para lograr las cosas, además de inspirarme a siempre seguir mis sueños. La crianza entregada por mis abuelos que en paz descansen, Alicia Vásquez, Matilde Labra y Orlando Villagra fueron esenciales para mi formación como persona y futuro profesional. Es por lo anterior que agradezco cada minuto la oportunidad de elegir una carrera profesional y sentir el apoyo para lograrlo.

Agradezco a Javiera Peredo, mi pareja desde que inicie este proceso, quien me ha apoyado y motivado en los peores y mejores momentos de mi carrera universitaria, siendo el sostén de mis momentos mas importantes dentro de la carrera, entregando un apoyo emocional, sin el cual hubiera sido posible este trabajo.

Doy las gracias a mis profesores, especialmente a quienes fueron parte importante en mi formación, Francisco Rivas, Kenji Naito y Diógenes Hernandez, quienes me enseñaron y guiaron durante toda la etapa universitaria.

Agradezco a mi profesor guía, Manuel Viera por darme la oportunidad de realizar este proyecto, además de abrirme las puertas en *Metaproject* para fortalecer mis conocimientos del tema, y encontrar un apoyo técnico en los momentos necesarios. Adicionalmente, agradezco a Dominique Viera, gestora de este trabajo de título, sin quien no hubiera sido posible el desarrollo del mismo.

Finalmente, agradezco a mis amigos que fueron parte de todo el proceso universitario, por los momentos de camaradería, de noches de estudio y esfuerzo, de risas y llantos, Cristóbal Herrera, Fernando Pinilla, Bernardo Cruces, Javier Salgado, Juan Fuentes, Mario Quezada, Adrian Riquelme y Juan Pablo Verdugo.

RESUMEN

En la siguiente memoria se aborda una problemática que actualmente tiene soluciones parciales, el reciclaje de neumáticos fuera de uso de manera rentable y sostenible es un inconveniente que condiciona el trabajo de la minería dentro del país. De acuerdo con lo anterior, en el año 2016 entra en vigor la Ley de Fomento al Reciclaje, la cual busca que los fabricantes e importadores de determinados productos se hagan cargo de los residuos que estos producen.

De acuerdo a un estudio generado por CINC en el año 2019, se estima que la industria minera, junto a la industria de la construcción generan alrededor de 50.000 neumáticos fuera de uso por año, siendo las principales marcas importadas *Bridgestone* y *Michelin*. La industria minera por su parte, concentra la mayor generación de neumáticos fuera de uso en la región de Antofagasta, debido a la gran concentración de grandes faenas mineras en la zona.

En consecuencia de lo anterior, el proyecto presentado en este informe busca dar una solución a esta problemática basando el reciclaje de neumáticos fuera de uso en el ozono, gas altamente oxidante que puede degradar el neumático en una forma sustentable y de bajo costo. El objetivo principal de este trabajo es analizar la viabilidad que presenta esta solución, de forma técnica mediante ensayos de laboratorio con condiciones controladas. Adicionalmente, se establece un estudio económico de pre-factibilidad respecto a una planta de reciclaje basada en ozono para generar una disminución de tamaño del neumático, para posteriormente ser pasado a un reactor de pirólisis con el fin de obtener productos comercializables.

Este proyecto muestra la eficiencia del ozono como degradante del neumático comprobándolo mediante un diseño factorial, en el cual se evalúan dos factores principales, la concentración de ozono y la tensión a la cual necesariamente debe ser sometido para la formación de grietas. Con respecto a la factibilidad económica, se establece un flujo de caja con el fin de obtener indicadores económicos como el VAN y el TIR, para luego ser analizados mediante un análisis de riesgos simulando escenarios probables para los precios de venta de los productos obtenidos en el reciclaje.

Los resultados dan a conocer que el ozono efectivamente es un agente oxidante altamente capaz de degradar el neumático en un periodo de tres horas a una concentración de 11,5 ppm y una tensión de 20 kN, además de ser económicamente rentable generando un Valor Actual Neto para un proyecto de 10 años cercano a los 5 millones de dolares, con una probabilidad de éxito del 97 %.

En conclusión, es posible determinar que el ozono puede ser una alternativa frente a situaciones actuales, sin embargo, es necesario una continuación de estudios a nivel industrial para demostrar su utilización en la degradación de neumáticos fuera de uso de forma entera y no parcial, con el fin de optimizar el proceso y generar un reciclaje aun mas rentable sumado a los productos obtenidos en la pirólisis, entre los cuales se encuentra el aceite pirolítico, el *carbón black* y el acero.

Palabras claves: Neumáticos, Ozono, Reciclaje, Pirólisis y Factorial.

ABSTRACT

The following report addresses a problem that currently has partial solutions, the recycling of end-of-life tires in a profitable and sustainable manner is a drawback that conditions the work of mining within the country. In accordance with the above, in 2016 the Law for the Promotion of Recycling came into force, which seeks to make manufacturers and importers of certain products take charge of the waste they produce.

According to a study generated by CINC in 2019, it is estimated that the mining industry, together with the construction industry, generates around 50,000 end-of-life tires per year, the main imported brands being Bridgestone and Michelin. The mining industry, on the other hand, concentrates the largest generation of used tires in the Antofagasta region, due to the high concentration of large mining operations in the area.

As a consequence of the above, the project presented in this report seeks to provide a solution to this problem by basing the recycling of end-of-life tires on ozone, a highly oxidizing gas that can degrade the tire in a sustainable and low-cost way. The main objective of this work is to analyze the feasibility of this solution, in a technical way through laboratory tests under controlled conditions. Additionally, a pre-feasibility economic study is established regarding a recycling plant based on ozone to generate a decrease in tire size, to be subsequently passed to a pyrolysis reactor in order to obtain marketable products.

This project shows the efficiency of ozone as a tire degradant by means of a factorial design, in which two main factors are evaluated, the ozone concentration and the stress to which it must necessarily be subjected for the formation of cracks. With respect to the economic feasibility, a cash flow is established in order to obtain economic indicators such as NPV and IRR, which are then analyzed by means of a risk analysis simulating probable scenarios for the sale prices of the products obtained in the recycling process.

The results show that ozone is indeed an oxidizing agent highly capable of degrading the tire in a period of three hours at a concentration of 11.5 ppm and a tension of 20 kN, besides being economically profitable, generating a Net Present Value for a 10-year project close to 5 million dollars, with a probability of success of 97 %.

In conclusion, it is possible to determine that ozone can be an alternative to current situations, however, it is necessary to continue studies at industrial level to demonstrate its use in the degradation of end-of-life tires in a complete and not partial way, in order to optimize the process and generate an even more profitable recycling added to the products obtained in the pyrolysis, among which are pyrolytic oil, black carbon and steel.

A mi familia . . .

A mis padres, Hugo Villagra y Elina San Martín. A mis abuelos que en paz descansen, Alicia, Orlando y Matilde...

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA	2
1.4. OBJETIVOS	2
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.5. ALCANCES	3
1.6. METODOLOGÍA	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. NEUMÁTICOS OFF THE ROAD Y SUS CARACTERÍSTICAS	5
2.1.1. DEFINICIÓN	5
2.1.2. COMPOSICIÓN	5
2.1.3. ESTRUCTURA DE UN NEUMÁTICO	6
2.2. RECICLAJE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO	7
2.2.1. NORMATIVA ACTUAL	7
2.2.1.1. LEY REP	7
2.2.1.2. CATEGORIZACIÓN SEGÚN LA NORMATIVA	8
2.2.2. METAS DE VALORIZACIÓN	8
2.2.3. CONCEPTOS	9
2.2.4. TÉCNICAS DE RECICLAJE	10
2.2.4.1. REDUCCIÓN DE TAMAÑO	10
2.2.4.2. PIRÓLISIS	11
2.2.4.3. DESVULCANIZACIÓN	13
2.3. OZONO	13
2.3.1. CONTEXTO	13
2.3.2. PROPIEDADES	13
2.3.2.1. ESTRUCTURA MOLECULAR	14
2.3.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS	14
2.3.2.3. PROPIEDADES QUÍMICAS	16
2.3.3. TIPOS DE OZONO	18
2.3.3.1. OZONO ESTRATOSFÉRICO	18
2.3.3.2. OZONO TROPOSFÉRICO	18
2.3.4. GENERACIÓN DE OZONO	18
2.3.4.1. EFECTO CORONA	19
2.3.4.2. PLASMA	19
2.3.5. APLICACIONES DEL OZONO	20
2.3.5.1. OZONO COMO POTABILIZADOR DE AGUA	20
2.3.5.2. OZONO EN LA DEGRADACIÓN DE NEUMÁTICOS	20

3. METODOLOGÍA	22
3.1. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN	22
3.2. FASE EXPERIMENTAL	22
3.2.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO	24
3.2.2. MUESTRAS	25
3.2.3. DISEÑO FACTORIAL	25
3.2.4. ELECCIÓN DE LAS MUESTRAS	26
3.2.5. GENERADOR DE OZONO	26
3.2.6. CONCENTRACIÓN DE OZONO	26
3.2.7. TENSIÓN A LA CUAL SE SOMETE EL NEUMÁTICO	27
3.2.8. FRACTURAMIENTO DEL NEUMÁTICO	27
3.3. FASE ECONÓMICA	28
3.3.1. ESTRUCTURA Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA	28
3.3.2. ESTUDIO DE MERCADO	28
3.3.3. VIABILIDAD DEL PROYECTO	29
3.3.4. ANÁLISIS DE RIESGOS	29
4. RESULTADOS	30
4.1. FASE EXPERIMENTAL	30
4.1.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO	30
4.1.2. DISEÑO FACTORIAL	32
4.1.3. CLUSTERING DE MUESTRAS	33
4.1.4. CÁLCULO DE LA TENSIÓN	35
4.1.5. APLICACIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL	35
4.1.5.1. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL	36
4.1.5.2. GRÁFICAS PARA EL FRACTURAMIENTO	41
4.2. FASE ECONÓMICA	43
4.2.1. ESTRUCTURA DE LA PLANTA	43
4.2.2. LOCALIZACIÓN	44
4.2.3. ESTUDIO DE MERCADO	45
4.2.3.1. ANÁLISIS LEGAL	45
4.2.3.2. ANÁLISIS DE LA DEMANDA	46
4.2.3.3. ANÁLISIS DE LA OFERTA	47
4.2.4. VIABILIDAD ECONÓMICA	48
4.2.4.1. PARIDAD CAMBIARÍA	48
4.2.4.2. INVERSIONES	48
4.2.4.3. GASTOS OPERACIONALES	50
4.2.4.4. CAPEX Y OPEX	51
4.2.4.5. INGRESOS	52
4.2.4.6. OPCIÓN DE FINANCIAMIENTO	53
4.2.4.7. FLUJOS DE CAJA	54
4.2.4.8. INDICADORES ECONÓMICOS	56
4.2.5. ANÁLISIS DE RIESGOS	57
4.2.5.1. ENTRADAS	57
4.2.5.2. SALIDAS	58
4.2.5.3. ESTADÍGRAFOS	59
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
5.1. FASE EXPERIMENTAL	62
5.1.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO	62
5.1.2. CLUSTERING DE MUESTRAS	62
5.1.3. DISEÑO FACTORIAL	63
5.1.3.1. COEFICIENTES DEL MODELO Y VARIANZA	63
5.1.3.2. GRÁFICAS	64

5.2. FASE ECONÓMICA	66
5.2.1. VIABILIDAD ECONÓMICA	66
5.2.2. ANÁLISIS DE RIESGOS	67
6. CONCLUSIONES	69
6.0.1. RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71
A. ANEXO	73
A.1. DISEÑO FACTORIAL	73
A.1.1. COEFICIENTES DEL MODELO	73
A.1.1.1. COEFICIENTES	73
A.1.1.2. ERRORES	74
A.1.1.3. VALOR T	74
A.1.1.4. FIV	74
A.1.2. ANÁLISIS DE LA VARIANZA	74
A.1.2.1. ANÁLISIS DE YATES	74
A.1.2.2. CUADRADOS MEDIOS	75
A.1.2.3. PRUEBA DE FISHER	75
A.1.2.4. VALOR P	75
A.2. CLUSTERING O AGRUPAMIENTO	76
A.2.1. TIPOS DE AGRUPAMIENTO	77
B. APÉNDICE	78
B.1. TABLAS	78
B.2. FIGURAS Y GRÁFICOS	82
B.3. FOTOGRAFÍAS	87

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Composición típica de los neumáticos (Convención de Basilea, 1999).	6
2.2. Composición química de los neumáticos (<i>Bundesamt für Umwelt</i> , 2003).	6
2.3. Metas de valorización para neumáticos mineros categoría A (Decreto N° 8, 2019).	9
2.4. Metas de valorización para neumáticos mineros categoría B (Decreto N° 8, 2019).	9
2.5. Constantes físicas del Ozono (Deniss Klauson).	15
4.1. Tiempo de fracturamiento de pruebas exploratorias.	31
4.2. Diseño factorial completo de dos factores.	32
4.3. Partición final de agrupamiento de las muestras.	34
4.4. Centroides de grupo del agrupamiento de las muestras.	34
4.5. Centroides entre los respectivos grupos de muestras.	34
4.6. Muestras seleccionadas para el diseño factorial.	35
4.7. Tensiones a las cuales son sometidas las muestras.	35
4.8. Resultados de fracturamiento.	36
4.9. Coeficientes del modelo factorial.	37
4.10. Resumen del modelo factorial.	37
4.11. Análisis de la varianza del modelo.	38
4.12. Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes.	38
4.13. Resumen de productos de la pirólisis.	44
4.14. Inventario de Neumáticos Fuera de Uso (Alta Ley, 2021).	44
4.15. Plantas ubicadas en la segunda región.	48
4.16. Indicadores económicos diarios actuales.	48
4.17. Inversiones directas.	49
4.18. Inversiones indirectas.	49
4.19. Resumen del consumo energético de la planta de reciclaje.	50
4.20. Resumen del consumo de combustible.	50
4.21. Resumen de las remuneraciones.	51
4.22. Resumen del CAPEX.	51
4.23. Resumen del OPEX.	52
4.24. Resumen de precios por la venta de los productos generados en la pirólisis.	53
4.25. Resumen de ingresos.	53
4.26. Tabla de amortización del préstamo.	54
4.27. Flujo de caja sin financiamiento.	55
4.28. Flujo de caja con financiamiento.	56
4.29. Resumen de los indicadores económicos.	57
4.30. Resumen de INPUTS para el análisis de riesgos.	58
4.31. Resumen de OUTPUTS para el análisis de riesgos.	58
4.32. Resumen detallado para el VAN sin financiamiento.	60
4.33. Resumen de estadígrafos del análisis de riesgo.	61
B.1. Detalle de las muestras utilizadas.	78
B.2. Pasos de amalgamación del agrupamiento de muestras.	80

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Partes que componen a un neumático (<i>Bridgestone</i>).	7
2.2. Diagrama de flujo de utilización de NFU.	10
2.3. Reacción química de la pirólisis de un neumático.)	11
2.4. Esquema de la pirólisis (Martinez, 2013.)	12
2.5. Estructuras de resonancia del Ozono (Deniss Klauson).	14
2.6. Estructuras de resonancia del Ozono (Deniss Klauson).	16
2.7. Formación de una molécula de Ozono (B Langlais).	19
2.8. Ejemplo de presión sobre el neumático (Kharkov Institute of Physics and Technology”).	21
2.9. Degradación versus tiempo del neumático expuesto a ozono (Kharkov Institute of Physics and Technology”).	21
3.1. Esquema de reactor de Ozono.	23
3.2. Rejilla para sujeción de trozos de neumáticos en tensión.	23
3.3. Esquema de la fase experimental.	24
3.4. Parámetro para la medición de alto, largo y ancho de las muestras.	25
4.1. Fotografías de distintos niveles de fracturamiento.	36
4.2. Diagrama de Pareto del modelo.	39
4.3. Histograma de la frecuencia y el residuo.	39
4.4. Gráfica de probabilidad normal del modelo.	40
4.5. Gráfica del residuo y el valor ajustado del modelo.	40
4.6. Gráfica del residuo y el orden de observación.	41
4.7. Gráfica de medias ajustadas del fracturamiento ante ambos factores.	41
4.8. Gráfica de interacción de medias ajustadas para ambos factores.	42
4.9. Diagrama propuesto para la planta de reciclaje.	43
4.10. Distancias a las principales faenas mineras.	45
4.11. Importaciones de neumáticos OTR por marca 2005-2019.	47
4.12. Neumáticos OTR importados según dimensión.	47
A.1. Ilustración de un agrupamiento subjetivo (Rui Xun, Don Wunsch).	76
B.1. Dendrograma del agrupamiento de las muestras.	82
B.2. Gráfica de probabilidad para el Aceite Piroclítico.	83
B.3. Gráfica de probabilidad para el Carbón <i>Black</i>	83
B.4. Gráfica de probabilidad para el Acero.	84
B.5. Gráfica de probabilidad para la Tasa Ecológica.	84
B.6. Gráfica para el VAN sin financiamiento simulado.	85
B.7. Gráfica para el TIR sin financiamiento simulado.	85
B.8. Gráfica para el VAN con financiamiento simulado.	86
B.9. Gráfica para el TIR con financiamiento simulado.	86
B.10. Fotografía de un trozo de neumático siendo sometido a una ozonificación intermitente.	87

B.11. Fotografía de un trozo de neumático siendo sometido a una inyección constante de ozono en un ambiente líquido de agua destilada.	87
B.12. Fotografía de un trozo de neumático siendo sometido a una inyección constante de ozono en un ambiente líquido de aceite vegetal.	88
B.13. Fotografía de un trozo de neumático siendo sometido a una inyección constante de ozono en un ambiente sin aditivos.	88
B.14. Fotografía de las muestras proporcionadas por <i>Metaproject</i>	89
B.15. Fotografía del tanque de oxígeno utilizado.	89
B.16. Fotografía del generador de ozono utilizado.	90
B.17. Fotografía del sensor de ozono utilizado.	90
B.18. Fotografía del reactor de ozonificación utilizado.	91
B.19. Fotografías de la primera situación de éxito.	91
B.20. Fotografía del sistema de tensión elaborado.	92

1 | INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

Una de las problemáticas sin solucionar dentro del rubro minero es la acumulación de neumáticos fuera de uso, lo cual se traduce en un problema medioambiental para el país. En Chile se desechan aproximadamente 6.6 millones de neumáticos por año, lo que corresponde a una cifra cercana a las 180 mil toneladas. Considerando el desgaste por su uso, la generación por año de residuos se estima en las 140 mil toneladas. De esta acumulación de neumáticos, alrededor del 17 % se maneja de una forma ambientalmente racional, lo que da como resultado un aproximado de 83 % de residuos depositados en forma ilegal en basurales, vertederos clandestinos, o desconociendo el destino de la gran mayoría de estos [1].

En base a lo anterior, en el año 2016 entro en vigor la Ley de Fomento al Reciclaje, también llamada como Responsabilidad Extendida del Productor (REP), la cual establece que los fabricantes e importadores de determinados productos deben hacerse cargo de los residuos que estos producen.

La Ley REP trae consigo una oportunidad de negocio, la cual radica en la opción de poder generar valor a los residuos de neumáticos. Existen diversas plantas de reciclajes en el mundo, las cuales operan con diversos mecanismos que serán mencionados mas adelante, logrando generar productos comerciables para generar rentabilidad al reciclaje. En Chile actualmente no existe ninguna planta de reciclaje de neumáticos mineros en operación.

La motivación principal de este proyecto es el compromiso medioambiental y de entorno. Estos factores han ido en aumento en el interés común de la sociedad, por lo cual una empresa que entienda esto como una naturaleza de la inversión puede mejorar el futuro y la rentabilidad de su negocio.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los problemas de acumulación de neumáticos fuera de uso dentro de la actividad minera han ido en aumento, uno de ellos es la cantidad de productos químicos tóxicos que se encuentran en su composición, lo cual conduce a la lixiviación de toxinas en el suelo y el agua cercana. Eliminar los neumáticos quemándolos puede generar graves

consecuencias para el medioambiente. Adicionalmente, existe un peligro latente en la salud pública de las comunidades aledañas a estos botaderos, los cuales generan condiciones adecuadas para la propagación de enfermedades al acumular plagas de mosquitos, los cuales introducen sus larvas en aguas estancadas que quedan en los neumáticos luego de aguas lluvia.

El reciclaje de neumáticos fuera de uso se ve como una opción ante estas problemáticas, sin embargo, existen dificultades para generar rentabilidad de una planta de reciclaje. El principal problema en la rentabilidad es el transporte de los neumáticos, los cuales llegan a pesar aproximadamente 6 toneladas cada uno, requieren de una logística e inversión a gran escala para mover los neumáticos fuera de eso desde su punto de acopio hasta una eventual planta. Otra dificultad en la rentabilidad de este negocio es la trituración de un neumático, actualmente existen chancadoras y molindas que pueden reducir el tamaño, sin embargo, tienen costos elevados debido a la energía requerida en este proceso. Como alternativa al chancado y molienda, existen plantas de reciclaje que utilizan cuchillas para trozar el neumático, llegando a costos operativos elevados que resultan en un negocio poco atractivo.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Luego de exhibir las problemáticas existentes dentro del reciclaje de neumáticos mineros se genera una pregunta, ¿existe una alternativa para hacer el negocio económicamente rentable? En este proyecto se plantea el ozono como una solución a la problemática de trituración y conminución. El ozono puede degradar un neumático minero mediante un proceso de oxidación, el cual mediante temperatura genera una reacción REDOX que disminuye el tamaño del mismo. Este proceso tiene costos operativos inferiores a las opciones que actualmente existen en el mercado, por lo cual utilizar el ozono permite realizar un reciclaje económicamente rentable.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la factibilidad técnica y económica del Ozono como degradante de neumáticos mineros, para enfrentar la demanda actual de NFU en Chile realizando un estudio experimental y económico con el fin de proponer un nuevo sistema de reciclaje de neumáticos mineros fuera de uso desde un punto de vista sustentable, con economía circular, planetaria y del bien común.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar las técnicas actuales para el reciclaje de neumáticos mineros con el fin de interiorizar y nutrir los conocimientos actuales.

- Realizar un análisis técnico en laboratorio para comprobar al ozono como degradante.
- Generar un estudio económico para evaluar una planta de reciclaje de neumáticos fuera de uso en base a Ozono.
- Consolidar la fase experimental y la económica para concluir si efectivamente el Ozono es un gas técnicamente factible y económicamente rentable para el reciclaje de neumáticos fuera de uso.

1.5. ALCANCES

En esta memoria se aborda al ozono como una opción dentro del reciclaje de neumáticos mineros, realizando un estudio de pre-factibilidad sobre la factibilidad técnica y económica de una planta de oxidación avanzada mediante ozono que permita degradar los neumáticos.

Dentro de la factibilidad técnica, se incluye un ensayo de laboratorio realizado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca utilizando trozos de neumáticos mineros de las marcas Michelin y Bridgestone otorgados por la empresa *Metaproject*, sin embargo, este trabajo no incluye pruebas realizadas a nivel industrial.

Con respecto a la factibilidad económica, se incluye una evaluación de proyecto mediante un flujo de caja con datos extraídos de estudios realizados por *Metaproject*.

No se incluye un análisis técnico de una planta de reciclaje completa, es decir, no se incluye un análisis técnico de métodos de reciclaje como la pirólisis o termólisis. Para lo mencionado anteriormente se utilizan referencias bibliográficas ya existentes, además de los estudios realizados por *Metaproject*.

1.6. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se separa en tres etapas importantes, las cuales son la búsqueda de información, el trabajo en la fase experimental y el trabajo en la fase económica. La búsqueda de información se utilizan referencias bibliográficas disponibles en el portal de la biblioteca de la Universidad de Talca, además de otros portales como lo son *ResearchGate*, *Scholar Google*, *Academia.edu*, entre otros. Adicional a lo anterior, se utilizan estudios de diversas organizaciones ligadas a la industria minera como lo son la Cámara Minera de Chile, Alta Ley y la Cámara de la Industria del Neumático.

La fase experimental se centra en validar al ozono como degradante del neumático, para lo cual se cuenta con un total de 38 muestras, las cuales son sometidas a un ensayo de tensión e inyección de ozono para determinar el grado de fracturación que presenta el mismo en base al tamaño de las grietas formadas con relación al ancho de la muestra. Para los niveles de concentración y tensión se varían utilizando un generador de ozono y un sistema de tensión basado en un estiramiento en base a pernos utilizando la Ley de elasticidad de *Hooke*.

La fase económica se basa en un flujo de caja de una planta de reciclaje de neumáticos fuera de uso mediante Ozono, obteniendo los OPEX y CAPEX respectivos al proceso, con el fin de demostrar que es económicamente rentable el proceso. Adicionalmente se establece un análisis de riesgo del proyecto.

2 | REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. NEUMÁTICOS OFF THE ROAD Y SUS CARACTERÍSTICAS

2.1.1. DEFINICIÓN

La principal función de un neumático es proveer una superficie de contacto entre un vehículo y una superficie. Esta compuesto por una cubierta de caucho que contiene aire, lo cual soporta al vehículo y su carga. Aproximadamente el 20 % del consumo de combustible se puede ahorrar con un correcto diseño del neumático, por lo cual debe cumplir con varios parámetros importantes [2].

Dentro del rubro de la minería, existen distintos tipos de neumáticos que dan soporte a la maquinaria pesada. Por lo general el peso y los caminos donde transitan las máquinas pesadas son perjudiciales para la vida útil del neumático.

Los neumáticos utilizados en la minería se denominan como *OTR (Off the Road)*, los cuales se construyen para transitar en terrenos externos a una carretera común. Dentro de estos neumáticos, existen los macizos, convencionales y radiales.

2.1.2. COMPOSICIÓN

Un neumático tiene diferentes componentes que varían según el tamaño y tipo de neumático, los materiales típicos se detallan en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Composición típica de los neumáticos (Convención de Basilea, 1999).

Material	Neumático para vehículo liviano (%)	Neumático para vehículo de carga (%)
Caucho/elastómeros	47	45
Negro de humo	21,5	22
Metal	16,5	25
Textiles	5,5	0
Óxido de Zinc	1	2
Azufre	1	2
Aditivos	7,5	5

Los elementos químicos presentes en los neumáticos son detallados en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Composición química de los neumáticos (*Bundesamt für Umwelt, 2003*).

Elemento	Cantidad
Carbono	70 %
Hidrógeno	7 %
Óxido de Zinc	1 %
Azufre	1 %
Hierro	16 %
Oxígeno	4 %
Nitrógeno	0,5 %
Ácido esteárico	0,3 %
Halógenos	0,1 %
Compuestos de Cobre	200 ppm
Cadmio	10 ppm
Cromo	90 ppm
Níquel	80 ppm
Plomo	50 ppm

2.1.3. ESTRUCTURA DE UN NEUMÁTICO

Para comprender de mejor forma la manera en que los neumáticos fuera de uso afectan a las distintas faenas mineras y los problemas potenciales que pueden llegar a generar es necesario conocer la composición de los mismos.

Un neumático fuera de uso es aquel que ha traspasado su vida útil, por lo cual sus diferentes partes no son aptas

para ser utilizados, por lo que pasan a ser residuos.

En la Figura 2.1 es posible observar las partes que componen a un neumático y sus diferentes funciones.



Figura 2.1: Partes que componen a un neumático (*Bridgestone*).

2.2. RECICLAJE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO

2.2.1. NORMATIVA ACTUAL

2.2.1.1. LEY REP

La ley 20.920, denominada como “Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje” tiene como objetivo incorporar la valorización de los residuos como un elemento primordial en la gestión de los residuos sólidos e introducir en la regulación existente en la materia, un instrumento económico que busca generar mecanismos que permitan aumentar los niveles de reciclaje de los residuos que actualmente se disponen en rellenos sanitarios o son depositados en vertederos ilegales [3].

Se establece algunos instrumentos de gestión ambiental en materia de residuos, destacando entre ellos la REP, (Responsabilidad Extendida del Productor) la que se traduce en que el fabricante o importador deberá hacerse cargo del producto una vez terminada su vida útil, debiendo cumplir metas de reciclaje establecidas por el Ministerio del Medio Ambiente. La REP, implica que los productores de productos prioritarios deben cumplir con ciertas obligaciones tales como registrarse, organizar y financiar la gestión de residuo, cumplir metas de recolección y valorización a través de alguno de los sistemas de gestión y asegurar que el tratamiento de los residuos recolectados se realice por gestores autorizados [3].

Asimismo, la ley establece los siguientes principios: “El que contamina paga”, “Gradualidad”, “Inclusión”, “Jerarquía en el manejo de residuos”, “Libre competencia”, “Participativo”, “Precautorio”, “Preventivo”, “Responsabilidad del generador de un residuo” “Transparencia y publicidad” y el de “Trazabilidad”. Establece definiciones legales sobre los temas tratados en la ley [3].

En este contexto, la industria minera comienza un camino de dos años para cumplir la primera meta de la normativa, que establece que a 2023, el 25 % de los neumáticos mineros (de 45,49,51 o 57 pulgadas y más) deberán recolectarse y valorizarse [4].

2.2.1.2. CATEGORIZACIÓN SEGÚN LA NORMATIVA

De acuerdo al Decreto N ° 8 del año 2019, el cual establece las metas de recolección, valorización y otras obligaciones asociadas a los neumáticos, a fin de prevenir la generación de tales residuos y fomentar su reutilización, reciclaje u otro tipo de valorización, se define categoría como cada una de las clases de neumáticos que presentan características similares y en virtud de las cuales reciben un trato idéntico para efectos de dar cumplimiento a las obligaciones establecidas.

Mencionado lo anterior, se definen las siguientes categorías:

1. Neumáticos que tengan un aro inferior a 57 pulgadas, con excepción de los que tengan un aro igual a 45 pulgadas, a 49 pulgadas y a 51 pulgadas (“Categoría A”).
2. Neumáticos que tengan un aro igual a 45 pulgadas, a 49 pulgadas, a 51 pulgadas y aros iguales o mayores a 57 pulgadas (“Categoría B”).
3. Neumáticos de bicicletas y de sillas de rueda, o cualquier neumático similar a éstos en función de su peso o de la composición material de los mismos.
4. Neumáticos macizos, entendiéndose por tales a las piezas toroidales que no cuentan con una cámara de aire, sino que son completamente sólidas, desde la llanta, capa a capa.

Dentro de la minería a cielo abierto, la mayoría de los equipos entraría en la definición de “Categoría B”, de acuerdo a las grandes dimensiones que presentan, sin embargo, para la minería subterránea, algunos equipos pueden entrar en la “Categoría A” según el tamaño del neumático utilizado por el equipo.

2.2.2. METAS DE VALORIZACIÓN

Según el Decreto N ° 8 del año 2019, las metas de recolección y valorización de los neumáticos introducidos en el mercado nacional el año inmediatamente anterior, se fijan en una escala progresiva por año, siendo la meta de valorización de neumáticos mineros clasificados en la categoría A, la presentada en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Metas de valorización para neumáticos mineros categoría A (Decreto N° 8, 2019).

Año	Meta de recolección	Meta de valorización
Primer año calendario de vigencia	50 %	25 %
Segundo año calendario de vigencia	50 %	30 %
Tercer año calendario de vigencia	50 %	35 %
Cuarto año calendario de vigencia	80 %	60 %
Quinto año calendario de vigencia	80 %	60 %
Sexto año calendario de vigencia	80 %	80 %
Séptimo año calendario de vigencia	80 %	80 %
Octavo año calendario de vigencia	90 %	90 %

En el caso de neumáticos mineros clasificados en la categoría B, las metas de recolección se considera cumplida al momento de su valorización, y se presentan en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4: Metas de valorización para neumáticos mineros categoría B (Decreto N° 8, 2019).

Año	Meta de valorización
Primer año calendario de vigencia	25 %
Quinto año calendario de vigencia	75 %
Octavo año calendario de vigencia	100 %

La fiscalización del cumplimiento de las metas y obligaciones establecidas en el Decreto Decreto N° 8 del 2019, corresponderá a la Superintendencia del Medio Ambiente, la que se encuentra facultada para imponer multas de hasta 10.000 UTA anuales en caso de incumplimiento.

2.2.3. CONCEPTOS

Los neumáticos mineros pueden ser reciclados o reutilizados. Las actividades de reciclaje pueden ser divididas en cuatro categorías diferentes: primarias, secundarias, terciarias y cuaternarias. Las categorías primarias y terciarias apuntan a producir nuevos materiales con alta calidad. La categoría secundaria crea nuevos materiales con una calidad reducida, mientras la categoría cuaternaria apunta a recuperar la energía usada en los neumáticos. Las aplicaciones de la reutilización pueden ser ejemplificadas en la ingeniería cuando el propósito y las propiedades mecánicas son menos demandantes, por ejemplo, utilizar los neumáticos en campos deportivos o plazas recreacionales. Sin embargo, el reciclaje ha sido el interés principal en la ciencia y tecnología como una alternativa para la sustentabilidad [5].

En la Figura 2.2 es posible observar las diferentes rutas de utilización de neumáticos usados:

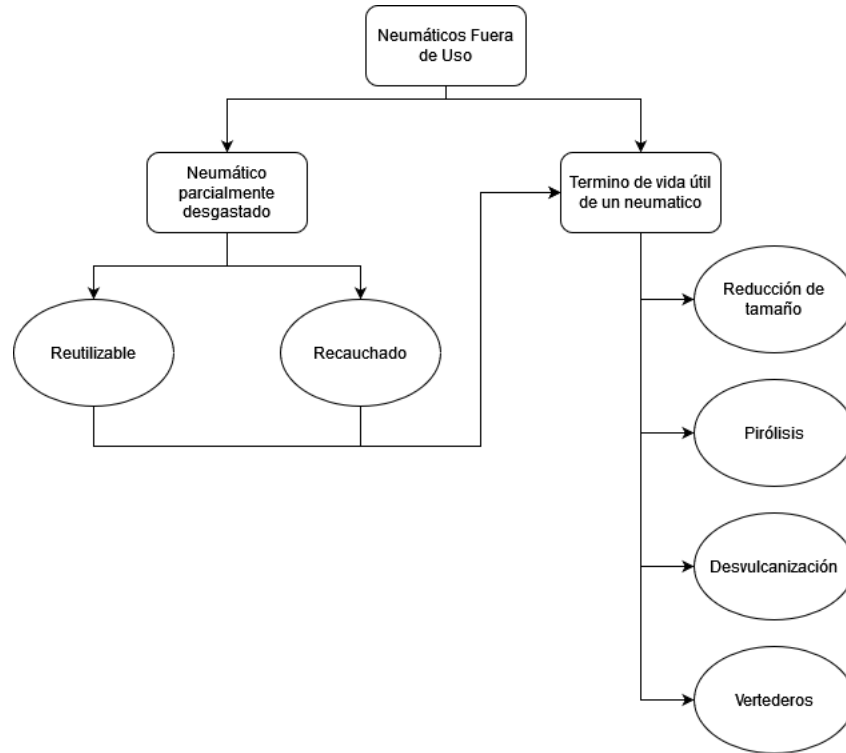


Figura 2.2: Diagrama de flujo de utilización de NFU.

La carcasa del neumático no se deteriora mucho durante el primer ciclo de la vida de un neumático, por lo cual pueden ser reutilizados mediante un recauchado de neumáticos viejos, sin embargo, es una práctica poco o nada utilizada dentro de la industria minera, debido a las condiciones de seguridad que esta requiere.

2.2.4. TÉCNICAS DE RECICLAJE

2.2.4.1. REDUCCIÓN DE TAMAÑO

La reducción de tamaño como técnica de reciclaje es típicamente ambiental o criogénica. La molienda ambiental es una tecnología de reducción de tamaño a temperatura ambiente. La reducción de tamaño criogénica es un proceso usado donde la temperatura puede variar entre los 80° a 120° C [6].

Las tecnologías de molienda ambiental pueden ser con molino de bolas, donde el tamaño de la partícula es controlado por el molino. Es posible generar partículas finas de caucho a temperatura ambiente mediante esta técnica, donde la aglomeración de las partículas finas se controla mediante el tiempo de residencia en el molino. La reducción de tamaño utiliza agua en su proceso, lo cual es necesario para evitar la combustión. Sin embargo, es posible no utilizar agua en el proceso, pero el ambiente húmedo disminuye la degradación a diferencia de la molienda seca [5].

2.2.4.2. PIRÓLISIS

La técnica de pirólisis es un proceso endotérmico donde el material orgánico es degradado mediante agentes oxidantes. La pirólisis es la suma de una serie de reacciones, donde el material orgánico alimentado al reactor sufre un *cracking* térmico, dividiéndose en una fracción volátil y un residuo sólido. El proceso de *cracking* inicia con enlaces C-C, ya que su energía de disociación es menor que un enlace C-H. El residuo sólido que es descompuesto en este proceso se transforma en Carbón *Black*, mientras la fracción volátil es transformada en gas y aceite pirolítico [5].

En la Figura 2.3 es posible observar la reacción química en la pirólisis.

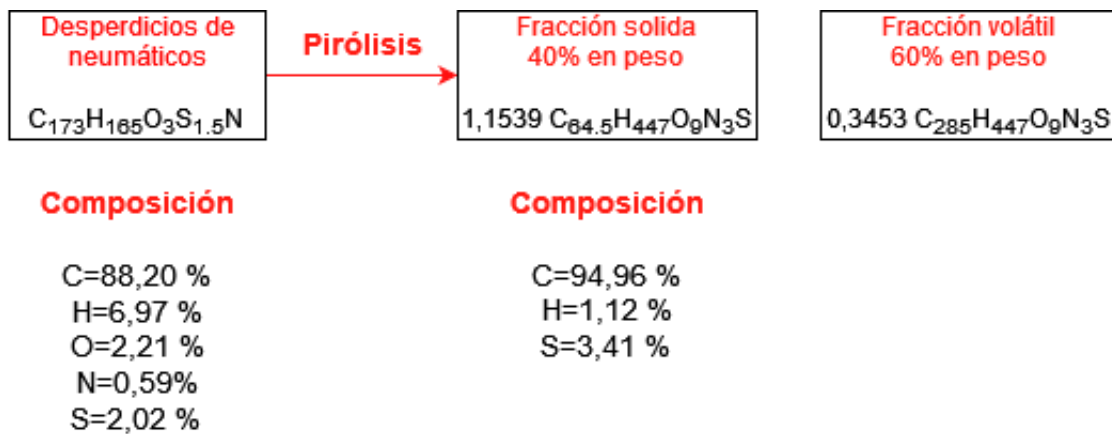


Figura 2.3: Reacción química de la pirólisis de un neumático.)

Existen diversos tipos de pirólisis, según las condiciones de funcionamiento. Es posible obtener una clasificación general simple como la pirólisis rápida y la pirólisis lenta. La pirólisis también es posible clasificarla en función del entorno utilizado, como pirólisis oxidativa, hidropirólisis, pirólisis de vapor, pirólisis catalítica y pirólisis al vacío. También es posible clasificarla según su sistema de calentamiento, como el microondas o la pirólisis por plasma. Los reactores de lecho fluidizado están principalmente asociados a la pirólisis rápida, mientras que reactores de lecho fijo están relacionados a la pirólisis lenta. Sin embargo, es posible realizar una pirólisis rápida en un reactor de lecho fijo ajustando la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de los volátiles con fines investigativos. Otros reactores como el AR y el cono rotatorio, también pueden clasificarse para realizar pirólisis rápida [7].

En la Figura 2.4 es posible observar la separación de un neumático y la obtención de sus productos, como lo son el aceite pirolítico, el gas y el carbón *black*.

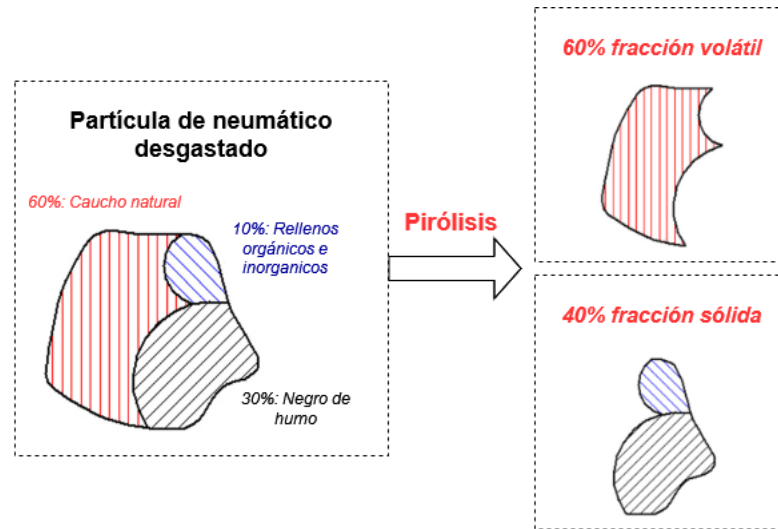


Figura 2.4: Esquema de la pirólisis (Martinez, 2013.)

a. OBTENCIÓN DE ACEITE PIROLÍTICO Y GAS

El proceso para la conversión térmica produce un gas de síntesis, el cual condensa parcialmente como aceite en el primer tanque separador del proceso. Los aceites pesados y ligeros recogidos del proceso son filtrados con un filtro prensa y bombeados a tanques de almacenamiento.

El gas obtenido en esta técnica es reincorporado al proceso general para obtener un calentamiento de los reactores hasta completar el proceso de la pirólisis.

Los aceites y gases varían entre diferentes reactores y condiciones de operación, entre las cuales se pueden mencionar el tiempo de residencia, la temperatura y el rango de calentamiento. Los tiempos de residencia varían entre los reactores dependiendo de la tecnología utilizada o el tamaño de la partícula. Las temperaturas utilizadas en este proceso afectan a la descomposición, la cual comienza a los 380 ° C y se termina a los 550 ° C [5].

El aceite producido en la pirólisis puede alcanzar un contenido energético de hasta 44 MJ/kg. Este aceite ha sido investigado para reemplazar los combustibles líquidos convencionales. Aunque el aceite de pirólisis tiene propiedades como combustibles líquidos convencionales, se puede observar que este aceite produce mayores emisiones CO, HC, SO₂ y humo en motores de inyección.

b. OBTENCIÓN DE CARBÓN BLACK

El carbón que se produce en la pirólisis es denominado “Carbón Black”, ya que se compone principalmente por negro de carbón y otros rellenos inorgánicos de los neumáticos fuera de uso. La cantidad obtenida en este proceso es similar a la de carbón black original, pero puede ser mayor debido a las reacciones secundarias que tratan el carbón y el alquitrán. Si el carbón black tiene valor comercial, puede tener efectos reductores en las emisiones de CO₂, ya que la producción de carbón black sería redundante. La composición del carbón black pirolítico contiene hasta un 10-15 % de ceniza, por lo tanto, no se puede reutilizar directamente, especialmente en productos de alto valor como

son los neumáticos [7].

2.2.4.3. DESVULCANIZACIÓN

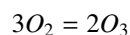
La desvulcanización es un proceso que utiliza aplicaciones mecánicas, térmicas, químicas, de microondas, ultrasónicas, biológicas, energía o una combinación de tecnologías para convertir el caucho en un estado en el que se pueda mezclar, procesar y vulcanizar nuevamente. El objetivo principal de la desvulcanización es romper los enlaces químicos de azufre del caucho, además de lograr la plasticidad que el caucho reciclado requiere [5].

2.3. OZONO

2.3.1. CONTEXTO

La historia del Ozono se remonta al año 1783, donde Yam Mamr, un filósofo de origen holandés, notó que el aire adquirió un olor marcado y característico cuando fue sometido al paso de chispas eléctricas en su máquina electrostática. En 1801 también llamó la atención el hecho de que el oxígeno gaseoso que se produce en la descomposición electrolítica de ácidos diluidos en determinadas condiciones poseía un olor similar al descrito en 1783. Schonbein en el año 1840, descubrió que el olor se debía a la presencia de un nuevo gas, al que se veía, es aquí cuando nace el nombre “Ozono”. Schobein también demostró que el ozono se formaba en procesos de autooxidación, notablemente en la reacción del aire sobre el fósforo, pero no pudo establecer la naturaleza o composición exacta de esta nueva sustancia [8].

Posterior a los estudios mencionados, existieron varias hipótesis especulativas hablando sobre la composición del Ozono, sin embargo, fueron Andrews, Tait y Soret en el año 1876 quienes probaron que el Ozono se trataba de una forma condensada del Oxígeno. Como resultado de sus experimentos, Soret llegó a la conclusión de que la molécula de Ozono consiste en tres átomos de Oxígeno:



Luego de Soret, diversos autores han estudiado el Ozono pudiendo detallar las diferentes propiedades del mismo, esto puede ser leído a detalle en el libro “Ozone” de E.K Rideal [8].

2.3.2. PROPIEDADES

El ozono es una molécula orgánica, es una forma alotrópica del oxígeno. El rango de reacción depende de la temperatura en la que se realice, además de la presión y concentración. La reacción se genera de forma lenta a temperaturas ambientes, pero bastante rápido, incluso llegando a velocidades de explosión térmica a temperaturas

elevadas. Además, la reacción es catalizada por muchos sensibilizadores. Las bajas temperaturas contribuyen a una mejor conservación del ozono [9].

El ozono en estado sólido tiene un color violeta intenso, sin embargo, cuando el mismo está un tamaño entre 0.2 a 0.5 mm es transparente, por lo cual se considera estado sólido capas superiores a 1 mm. El ozono sólido es capaz de comprimirse sin dificultades a 22.5 atm.

El ozono gaseoso, líquido o sólido explota fácilmente si se expone al calor, chispas, llamas o golpes, por lo cual debe ser trabajado con extrema precaución. Es importante conocer las propiedades y precauciones de seguridad, las impurezas por ejemplo, sensibilizan robustamente la ozono [9].

2.3.2.1. ESTRUCTURA MOLECULAR

El ozono es una partícula triatómica de oxígeno, que tiene una alta reactividad. Las estructuras de resonancia (Figura 2.5 son en cierto modo estructuras extremas de una molécula que en realidad no existe, pero las estructuras moléculas reales se encuentran en la resonancia. Estas estructuras son utilizadas cuando ninguna fórmula estructural convencional puede realmente describir la estructura química real, y las propiedades determinadas experimentalmente son tales que corresponden a todas las diferentes estructuras de resonancia simultáneas. Sin embargo, esta estructura por sí sola no puede entregar una forma precisa de la estructura molecular del Ozono [10].

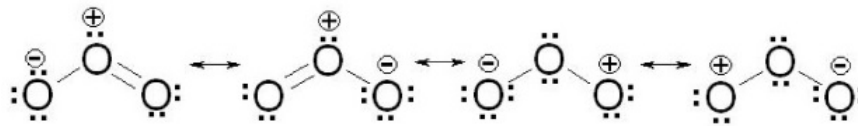


Figura 2.5: Estructuras de resonancia del Ozono (Deniss Klauson).

Una estructura alternativa para esta molécula, puede ser una estructura cíclica con átomos de oxígeno eléctricamente neutros conectados por enlaces simples [10].

2.3.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS

a. INFORMACIÓN BÁSICA

En condiciones estándar, el ozono es un gas azulado, sin embargo, a los niveles de concentración de la atmósfera se presenta como un gas incoloro. La densidad del ozono es 1.5 superior a la del aire. Mezclas gaseosas de ozono con oxígeno, nitrógeno o aire, son las mezclas ideales. A concentraciones superiores a 10 %- 11 % en volumen, la mezcla de ozono mencionada anteriormente puede ser explosiva. Trabajar con ozono en concentraciones bajas es considerado un trabajo seguro. Las propiedades físicas principales del ozono pueden ser vistas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Constantes físicas del Ozono (Deniss Klauson).

Parámetro	Valor
Masa Molecular	47,998 g mol ⁻¹
Densidad a 0° C	2,144 kg m ⁻³
Punto de fusión a 1 atm	-192,4 ° C
Punto de evaporación a 1 atm	-111,8 ° C
Temperatura crítica	-12,1 ° C
Presión crítica	54,62 atm
Densidad crítica	463 kg m ⁻³
Afinidad electrónica	1,9-2,7 eV
Constante dieléctrica a 0° C	1,0019
Constante dieléctrica a -183 ° C	4,75
Energía libre de formación	6,89 J mol ⁻¹
Calor de evaporación	0,71 J mol ⁻¹
Calor de disolución	0,93 J mol ⁻¹
Constante de difusión en el agua	1,74x10 ⁻⁹ m ² s ⁻¹
Constantes de Van der Waals	
<i>a</i>	3,545 atm L ² mol ⁻²
<i>b</i>	0,04903 L mol ⁻¹

b. SOLUBILIDAD

El ozono, así como el oxígeno, no es fácilmente soluble en agua. La solubilidad del ozono a distintas temperaturas con una presión de 1 atm puede ser vista en la Figura 2.6. Los valores de la solubilidad son presentados como el radio de solubilidad (S). La concentración en el agua está dado en mg L⁻¹. Por tanto, la Figura 2.6 muestra la dependencia del radio de solubilidad por temperatura, en el rango examinado en la literatura existente, de acuerdo a los estudios realizados por Deniss Klauson [10].

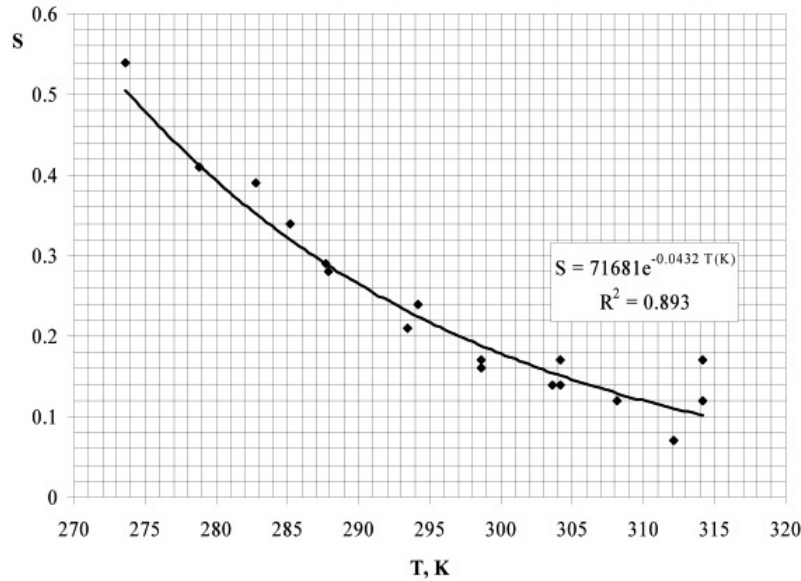


Figura 2.6: Estructuras de resonancia del Ozono (Deniss Klauson).

De acuerdo a Klauson [10], con la data experimental es posible deducir que la solubilidad de ozono sigue la Ley de Henry, la concentración de ozono disuelta a temperatura constante, con el aumento de la presión parcial del ozono en fase gaseosa sigue una tendencia casi lineal, como en la ley de Henry.

2.3.2.3. PROPIEDADES QUÍMICAS

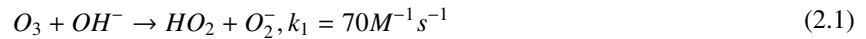
a. REACCIONES EN EL AGUA PRODUCTO DEL OZONO

El ozono puede iniciar reacciones radicales las cuales son de tipo óxido-reducción, simples o redox. En las reacciones que implican una transferencia de electrones, el ozono puede descomponerse de forma eficaz, sin embargo, esto da paso a que pueda actuar como un precursor en la formación de oxidantes mas poderosos que si mismo, por ejemplo, el hidroxilo, radical que como agente oxidante es mas poderoso incluso que el flúor. Las reacciones que puede iniciar el Ozono por medio de su descomposición en el agua es la formación de diversos radicales que pueden proceder en base a dos mecanismos básicos, el primero es el mecanismo de Hoigné-Staehlin-Bader, y el segundo es el mecanismo de Gordon-TomiyasuFukutomi, nombrados así por sus autores. El primer mecanismo se considera mas aceptado, sin embargo, a medida que los valores de acidez aumentan, el último mecanismo es más preciso [10].

b. MECANISMO DE HOIGNÉ-STAEHLIN-BADER

De acuerdo con este mecanismo, la formación de especies radicales comienza con la reacción del Ozono y el anión de hidróxido que se encuentra en el agua, principalmente como resultado de la hidrólisis de la molécula de agua. Como

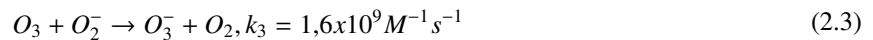
resultado de esta primera etapa (Reacción 2.1), se forman el radical hidroperóxido y el ion radical superóxido [10].



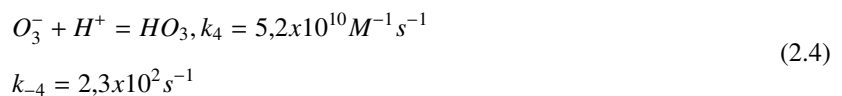
Como es posible observar del valor de la constante k_1 , el primer paso de la iniciación es lento, generando los límites de la etapa de descomposición del ozono. En la reacción anterior se forma el hidroperóxido. Sin embargo, es disociado para formar un protón y un radical superóxido en la Reacción 2.2:



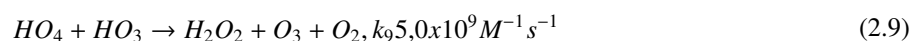
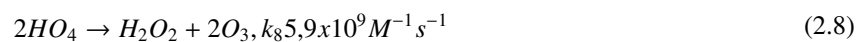
El ion radical superóxido es formado en estas reacciones, esto sirve como iniciador de una serie de reacciones en cadena, transfiriendo los electrones restantes a la molécula de ozono. La Reacción 2.3 muestra esta reacción con el ozono, en el momento en el que el ion radical Ozonido es formado:



El radical del ozono entra en una nueva etapa de reacción, formando un renovado y poderoso oxidante, el cual es el hidroxilo, el cual puede ser observado en la Reacción 2.4 y 2.5:



En radical hidroxilo puede iniciar las Reacciones 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9:



c. MECANISMO DE GORDON-TOMIYASU-FUKUTOMI

El mecanismo de Gordon-Tomiyasu-Fukutomi es un mecanismo aplicable a condiciones específicas, sobre todo para valores de acidez elevados. La iniciación en la reacción es diferente al mecanismo de Hoigné-Staehlin-Bader, dando como consecuencia una serie de reacciones diferentes para los distintos tipos de radical formados en este proceso. Esto puede ser leído a detalle en la revisión de las propiedades físicas y químicas del Ozono, desarrollado por Deniss Klauson [10].

2.3.3. TIPOS DE OZONO

2.3.3.1. OZONO ESTRATOSFÉRICO

La estratosfera representa el 90 % de la columna existente de Ozono, sin embargo, existe evidencia que sugiere que existen pérdidas en el ozono estratosférico, debido a una corriente ascendente de contaminantes generados por la actividad humana [11]. El ozono estratosférico es el que forma la llamada “capa de ozono”, la cual sirve como filtro para los rayos ultravioletas procedentes del Sol.

2.3.3.2. OZONO TROPOSFÉRICO

El ozono troposférico es principalmente producido por procesos naturales, también denominado como ozono ambiental, es el ozono que se encuentra a nivel alcanzable para el ser humano en actividades cotidianas. Existe evidencia de una tendencia en crecimiento sobre el ozono troposférico, sin embargo, actualmente suma el 10 % de la columna vertical de ozono existente. El ozono troposférico es altamente fitotóxico. Si se dan las condiciones adecuadas, el ozono puede producir efectos agudos o crónicos [11].

2.3.4. GENERACIÓN DE OZONO

Si bien existen procesos naturales que pueden dar pie a la generación de Ozono, también existen procesos artificiales creados por el hombre para utilizar el Ozono en diferentes aplicaciones que serán mencionadas más adelante. Existen dos técnicas principales para la generación de ozono de forma artificial, la primera es la utilización del “Efecto Corona” y la segunda técnica es la utilización de “Plasma frío”, técnica nueva e innovadora que ha revolucionado el mercado. Ambas técnicas nacieron de la necesidad de la utilización de Ozono, y su relativamente corta vida media, lo cual hace necesario generar ozono *in situ* para su utilización.

El ozono es generalmente creado por tres formas:

- Generación electroquímica (Efecto Corona).
- Generación de ozono por rayos ultravioleta (Generación natural).

- Generación de ozono en plasma no térmico producido por descargas eléctricas.

2.3.4.1. EFECTO CORONA

Es posible generar ozono cuando se aplica una energía suficiente a una molécula de oxígeno para conseguir disociarla y crear los radicales libres de oxígeno (Figura 2.7). Siguiendo lo anterior, se cumple la condición para formar una reacción entre una molécula de oxígeno y un átomo libre, generando el O_3 [12].

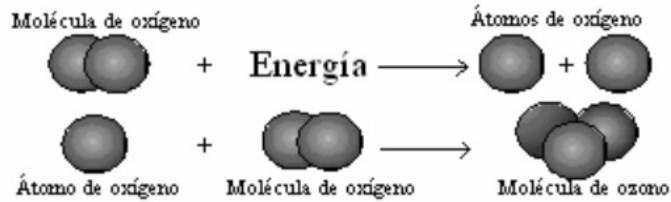


Figura 2.7: Formación de una molécula de Ozono (B Langlais).

En el año 1837, se desarrolló un equipo para obtener ozono mediante este método. Esta técnica fue propuesta por Werner y Siemens. Para la descarga eléctrica se utilizó una señal alterna de alto voltaje, generando altas concentraciones de ozono, por lo que en la actualidad sigue siendo una técnica muy utilizada debido a su eficiencia [13].

2.3.4.2. PLASMA

El plasma es una mezcla casi neutra de cargas neutras y partículas eléctricamente cargadas, las cuales poseen propiedades colectivas. Se puede clasificar según puntos de vista, uno de ellos es el equilibrio de temperaturas de iones y electrones. Cuando las temperaturas de electrones e iones son las mismas, hablamos de plasma térmico. Si la temperatura de los electrones es más alta que la temperatura de los iones hablamos de plasma no térmico. La ventaja del plasma no térmico es el consumo de energía, el cual es dirigido. En este caso, la energía se usa principalmente en la generación de electrones altamente energéticos y se pierde poca energía al calentar el volumen de un gas. Las tecnologías que se basan en plasma pueden ser eficaces en promover la oxidación, mejorar la disociación molecular, o producir radicales libres que estimulan la química plasmática. Estas reacciones se pueden utilizar en la generación de ozono u otras aplicaciones ecológicas como la descomposición de contaminantes del aire [14].

Existen mecanismos para la generación de ozono mediante este método que se diferencian en el número de reacciones involucradas. La generación de ozono por descarga eléctrica en el aire es complicada debido a la presencia del nitrógeno, lo cual provoca procesos de destrucción del ozono debido a la existencia de óxidos de nitrógeno. El papel que tienen los electrones producidos en una descarga eléctrica es excitar y disociar el oxígeno y el nitrógeno. Este método puede leerse a detalle en “Non-Thermal Plasma Ozone Generation” de S. Pekárek [14].

2.3.5. APLICACIONES DEL OZONO

Las aplicaciones actuales que puede tener el ozono de deben principalmente a la creación de generadores de ozono, basados en su mayoría en la generación de ozono mediante el efecto corona. Estos generadores son instalados directamente en el lugar de uso, permitiendo aprovechar las propiedades oxidantes del ozono en diversos campos [15].

El ozono se puede utilizar en cualquier caso donde se requiera una acción oxidante que sea eficaz sobre sustancias naturales, orgánicas, inorgánicas, minerales, biológicas, gaseosas, líquidas o sólidas. Sus principales aplicaciones son en la desinfección, eliminación de contaminantes, decoloración, reducción de toxicidad y degradación de compuestos específicos [15].

2.3.5.1. OZONO COMO POTABILIZADOR DE AGUA

El ozono al ser un fuerte desinfectante se convierte en una alternativa para los biocidas químicos en el tratamiento de agua de las torres de enfriamiento. El uso de ozono en estas torres tiene grandes ventajas, entre las cuales se encuentran la seguridad y facilidad de su uso, bajos costos en mantenimiento, la capacidad de generarlo *in situ*, no requiere desinfectantes adicionales, alta eficacia, sin compuestos clorados, etc [16].

El ozono es una de las alternativas más eficientes para desinfectar agua, debido a que actúa sobre microorganismos. De acuerdo con un estudio realizado por Diógenes Hernandez, académico de la Universidad de Talca, insertar ozono como potabilizador de agua elimina el 100 % las colonias de E. Coli y fecas. En conclusión, es posible generar una purificación de agua para el consumo humano utilizando la tecnología de Ozono [17].

2.3.5.2. OZONO EN LA DEGRADACIÓN DE NEUMÁTICOS

Dentro de los estudios de la desintegración de neumáticos utilizando ozono destaca el trabajo realizado por el *National Science Center “Kharkov Institute of Physics and Technology”* en Ucrania, el cual mediante un generador alimentado por un tanque de oxígeno demuestra los tiempos necesarios para llegar a una degradación del 100 % [18].

Dentro de la metodología de experimentación, se trabaja con una prensa dentada la cual ejerce presión sobre el neumático a medida que se va inyectando el gas. Esto puede ser visualizado en la Figura 2.8



Figura 2.8: Ejemplo de presión sobre el neumático (Kharkov Institute of Physics and Technology".)

El rompimiento de las fibras del neumático mediante ozono supone un proceso complejo tanto físico como químicamente, el ozono inicia el agrietamiento del mismo, el cual es apoyado por la fuerza ejercida por la prensa dentada, la cual separa los filamentos a través de las grietas producidas por el ozono [18].

En la Figura 2.9 es posible observar el radio de desintegración a través del tiempo, donde el radio de desintegración (α) es denominado como el peso de los filamentos rotos sobre el peso total de la muestra, expresado en porcentaje. El experimento fue realizado a una concentración constante de ozono de 20 g/m³ [18].

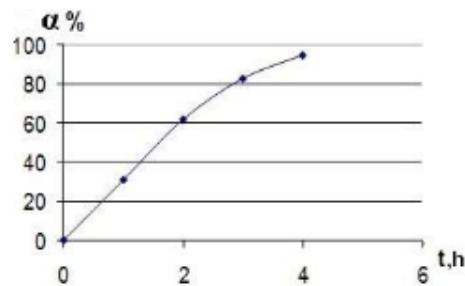


Figura 2.9: Degradación versus tiempo del neumático expuesto a ozono (Kharkov Institute of Physics and Technology".)

Dentro de la experimentación realizada por el Instituto de Física y Tecnología de Kharkov, determinaron los reactivos que aceleran el proceso de desintegración, siendo el más eficaz el etil acetato, seguido por el iso-octano, ciclo-hexeno y el benzol [18].

3 | METODOLOGÍA

3.1. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

Para la búsqueda de información de la revisión bibliográfica se utilizan diversas referencias, entre ellas se encuentran la biblioteca de la Universidad de Talca, portales web como *ResearchGate*, *Scholar Google*, *Academia.edu*, entre otros. Además de información obtenida de publicaciones de distintas empresas mineras como *Codelco*, *BHP*, *Antofagasta Minerals*, *Teck*, *Anglo American*, entre otras. Para estadísticas se utiliza información de organizaciones de la industria como lo son la Cámara Minera de Chile, *Alta Ley* y la Cámara de la Industria del Neumático.

3.2. FASE EXPERIMENTAL

Para la fase experimental de este proyecto, se utilizan trozos de neumáticos mineros *Michelin* y *Bridgestone* otorgados por *Metaproject*. En esta etapa se busca corroborar que el Ozono es un oxidante capaz de generar radicales libres en contacto con el neumático para su degradación.

Antes de comenzar la experiencia en laboratorio, es necesario generar un prototipo de reactor en el cual el neumático será depositado y sometido a Ozono en diversas condiciones que se detallaran más adelante. El presentado en la Figura 3.1 para el reactor se basa en un cilindro hueco de aproximadamente 20 centímetros de diámetro y 50 de largo, el cual es conectado a una cañería de inyección de Ozono en la parte inferior, regulado mediante una llave de paso. En la parte superior cuenta con una cañería de extracción por la cual el Ozono es retirado y regulado mediante una llave de paso.

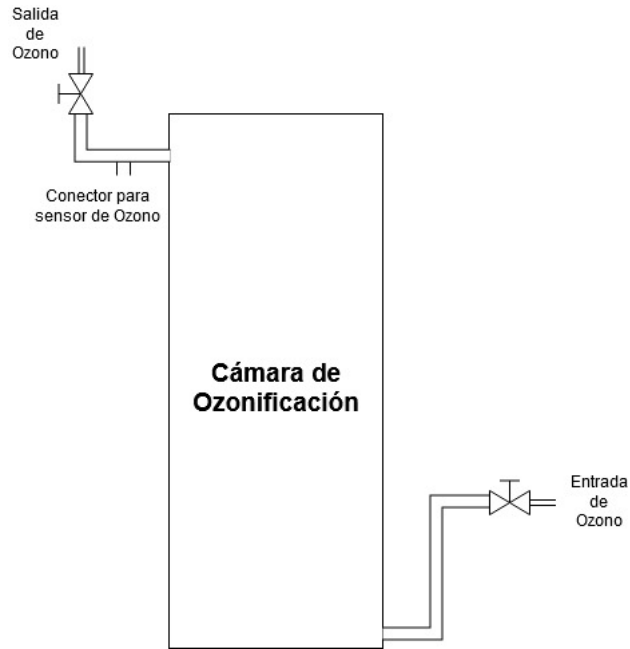


Figura 3.1: Esquema de reactor de Ozono.

Dentro de la cámara de ozonificación se diseña un recipiente externo, el cual consta de cuatro niveles en los cuales los trozos de neumáticos son sometidos a una tensión mediante pernos que sujetan el trozo de neumático respectivo. Dichos niveles cuentan con rejillas de 100 micras aproximadamente, en las cuales se depositan los trozos degradados de cada nivel y que se pueden ver en detalle en la Figura 3.2.

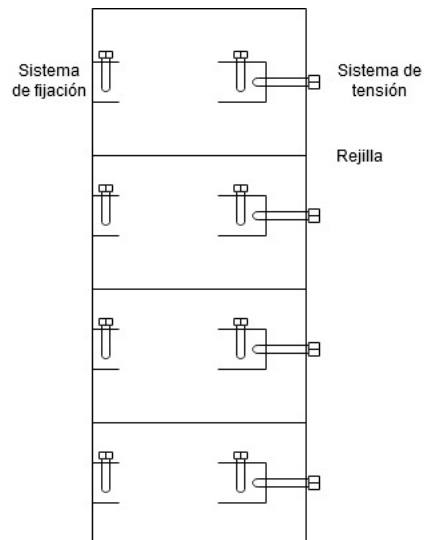


Figura 3.2: Rejilla para sujeción de trozos de neumáticos en tensión.

Luego de la confección de la cámara de ozonificación y el recipiente externo que somete a los trozos de neumáticos a tensión para aumentar los agrietamientos generados por el ozono, dicho recipiente es introducido a la

cámara para ser conectada a un generador de ozono alimentado por un tanque de oxígeno con una inyección de 5 ml/min. Para la extracción de ozono se utiliza una campana de gas con el fin de evitar la exposición al gas en la zona de trabajo, debido a que en concentraciones elevadas es dañino para el ser humano. En la Figura 3.3 es posible observar el esquema de trabajo diseñado.

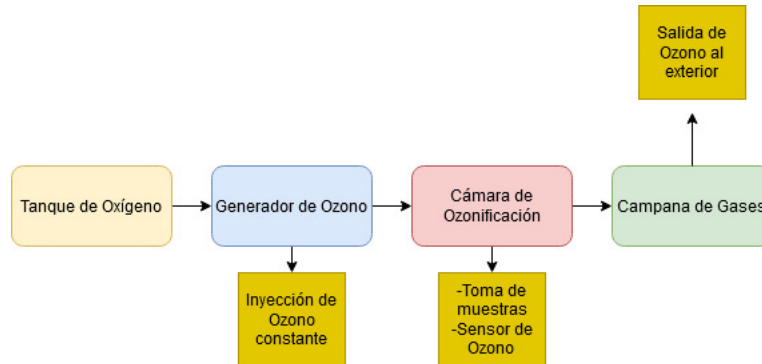


Figura 3.3: Esquema de la fase experimental.

Los trozos de neumáticos son sometidos a diferentes niveles de concentración de ozono, lo cual es medido en partes por millón. Además de ser sometidos a diferentes niveles de tensión, los cuales serán determinados mediante la Ley de elasticidad de *Hooke*, la cual establece que el alargamiento que experimenta un cuerpo es proporcional a la fuerza que se aplica en el mismo, pudiendo determinar la tensión en función del estiramiento al cual se somete el trozo de neumático en los puntos de fijación.

3.2.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO

Antes de comenzar las pruebas oficiales de la experimentación, es necesario generar un acercamiento hacia la etapa experimental, por lo cual inicialmente se establecen una serie de pruebas que conllevan a la decisión de establecer una metodología como la que se detalla a continuación.

Dentro de estas pruebas exploratorias, destacan la medición de la degradación del neumático sin ser sometido a tensión, la utilización de agua como acelerante, al igual que otros compuestos como lo son el aceite vegetal, acetona, etil acetato y el benzol.

Posterior a la toma de decisión de utilizar un sistema de tensión, se realiza un ensayo para determinar el fracturamiento del neumático sin la utilización de ozono siendo sometido única y exclusivamente al sistema de tensión, con la finalidad de determinar si la degradación experimentada es consecuencia de la acción del ozono o no.

En las Figuras B.10, B.11, B.12 y B.13 es posible observar alguno de los análisis previos.

3.2.2. MUESTRAS

Las muestras corresponden a trozos de neumáticos de las marcas *Michelin* y *Bridgestone* proporcionados por la empresa *Metaproject*. Se tiene un total de 38 muestras, donde su detalle es presentado en la Tabla B.1.

Para la medición de los parámetros de las muestras, se utilizó una balanza digital para la medición del peso de las muestras, y un pie de metro para la medición del alto, largo y ancho de las muestras. El parámetro para la medición del alto, largo y ancho de las muestras puede ser observado en la Figura 3.4

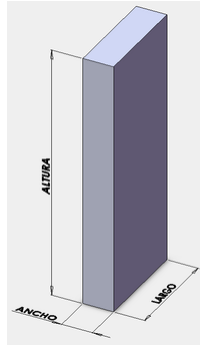


Figura 3.4: Parámetro para la medición de alto, largo y ancho de las muestras.

Del total de muestras (Figura B.14), un grupo es utilizado para un análisis exploratorio donde es posible determinar si el Ozono es un correcto oxidante para la degradación de un neumático. En esta etapa si bien existen datos recopilados, estos no son utilizados para el diseño factorial que evalúa la relación entre los factores.

3.2.3. DISEÑO FACTORIAL

Un diseño factorial es definido como un experimento que permite estudiar los diversos factores que inciden ante una respuesta, en este caso contamos con dos factores, los cuales son la concentración de ozono y la tensión a la cual son sometidos los trozos de neumáticos. Al momento de realizar un estudio, existen niveles que varían dependiendo de cada factor, dichos niveles son definidos como los valores que puede tomar el factor en cuestión. El beneficio de utilizar un diseño factorial es que permite estudiar la interacción entre los factores al variar los niveles al mismo tiempo en lugar de uno a la vez [19].

En este caso se utiliza un diseño factorial completo, en el cual se miden las respuestas para todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. El diseño factorial utilizado es evaluado utilizando el *software* estadístico *MINITAB 19*, el cual permite generar diseños factoriales completos que contienen factores de mas de dos niveles, siendo el número de corridas o experimentos a realizar calculado como 2^k , donde k es definido como la cantidad de factores a utilizar [19], en este caso se tiene un total de 2 factores, teniendo una cantidad de corridas igual a 8. Los diseños factoriales tienen un mayor acierto si se realizan repeticiones del experimento, lo cual permite disminuir el error

presentado por el factor humano a la hora de realizar un ensayo. En este proyecto se realiza un total de 3 repeticiones, dando un total de 24 ensayos a realizar.

El detalle teórico de un diseño factorial puede ser visto en detalle en el Anexo A.1.

3.2.4. ELECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Al tener 24 muestras para realizar el ensayo, de un total de 38, es necesario realizar una selección de cuales se van a utilizar. Para este proceso, se realiza un análisis de grupo mediante similitud, en cual relaciona ciertos parámetros de las muestras para agruparlas de acuerdo con la semejanza que estas posean. Para este caso se realiza un *clustering* utilizando el *software MINITAB 19*, el cual permite realizar un agrupamiento con un método de vinculación completo utilizando un método Euclidiano para medir la distancia entre los diferentes parámetros de las muestras con respecto al centroide generado por el algoritmo de *K-Means*. Los parámetros seleccionados para generar un agrupamiento son el alto y el largo, debido a que corresponden a muestras similares en geometría, lo cual permite trabajar de forma pareja en la metodología seleccionada.

La metodología del *clustering* utilizado es explicada en detalle en el Anexo A.2.

3.2.5. GENERADOR DE OZONO

Para este experimento se trabaja con un tanque de oxígeno, el cual es conectado directamente al generador de Ozono de 20 gr/hr mediante una manguera. En la Figura B.15 es posible observar el tanque utilizado en este ensayo.

Para este ensayo se utiliza un generador de ozono disponible en el laboratorio de química de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, el cual corresponde a un generador de la marca *Energía-On*, el cual proporciona una inyección de 20 g/h, con una alimentación de 220 VAC. El generador utilizado puede ser observado en la Figura B.16

3.2.6. CONCENTRACIÓN DE OZONO

Como fue mencionado anteriormente, la concentración de Ozono depende netamente de la capacidad de inyección y del recipiente en el cual se expande el gas.

La medición de los niveles de concentración es realizada mediante un sensor disponible en el laboratorio de química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca de la marca *EcoSensors*, el cual realiza su medición en partes por millón en un rango de 0 a 14 ppm. En la Figura B.17 es posible observar el sensor utilizado.

La variación de la concentración de Ozono es regulada mediante las llaves de paso que contiene el ozonizador generado, en el cual se logran establecer dos niveles de concentración constante los cuales son utilizados posteriormente

para los ensayos.

3.2.7. TENSION A LA CUAL SE SOMETE EL NEUMÁTICO

Para el cálculo de la tensión, los trozos de neumáticos son estirados mediante el sistema de tensión de acuerdo a la distancia entre el eje móvil de tensión y la pared lateral de la rejilla de sujeción (alargamiento o deformación unitaria). Dicha tensión varía en cuatro niveles de variación de longitud del trozo de neumático, siendo la tensión calculada mediante la Ley de *Hooke* [20], en la cual, para efectos prácticos se genera la suposición de que el neumático se encuentra estirado de forma tal que no supera el límite elástico, con el fin de determinar la tensión que se presenta en el cuerpo como la descrita en la Ecuación 3.1. Los detalles y referencias para estos cálculos son presentados en el Anexo de este trabajo.

$$\sigma_e = E * e$$

Donde :

$$\sigma_e : \text{Tensión en la Zona Elástica.} \quad (3.1)$$

E : Módulo de *Young*.

e : Alargamiento o deformación unitaria.

Para el Módulo de *Young* se utiliza un valor de 1 MPa, el cual oscila entre los valores medios determinados en un estudio realizado por el *Department of Soil Mechanics and Foundation Engineering* de la Universidad de Lulea [21].

3.2.8. FRACTURAMIENTO DEL NEUMÁTICO

La intención de esta etapa del trabajo es comprobar el efecto del Ozono en la formación de grietas en el neumático, producto del contacto de los radicales libres formados en contacto con el caucho. Si bien existen técnicas para medir la degradación, como lo son la variación de masa que experimenta un cuerpo a medida que se somete a una acción, esta metodología no es válida para determinar la degradación en la metodología expuesta anteriormente, debido a que, al ser sometido a tensión, el neumático puede generar una ruptura parcial o completa, lo cual impide la continuación de formación de grietas debido a que es separado del sistema de tensión propuesto. Para solucionar lo anterior en una forma cuantificable, se plantea una metodología en base a la formación de grietas en base al ancho de la muestra.

La medición de la degradación de las muestras producto a la ozonificación y a la tensión experimentada, para efectos prácticos se traduce en la medición del fracturamiento que presentan las muestras, siendo calculado como la longitud de la grieta mayor a través del ancho de la muestra, sobre el ancho total medido inicialmente. En la Ecuación 3.2 es posible observar la fórmula utilizada para determinar el fracturamiento, que en este caso será tratado como un

sinónimo de la degradación.

$$F = \frac{g}{A}$$

Donde :

F : Fracturamiento de la muestra. (3.2)

g : Grieta de mayor longitud a lo ancho de la muestra.

A : Ancho total de la muestra.

3.3. FASE ECONÓMICA

La fase económica de este proyecto no incluye la cotización real de un reactor de ozonificación por lo cual se establece un precio estimativo establecido por la empresa *Metaproject*, el cual considera la industrialización de un reactor basado en ozono y tensión, además de incluir los estudios necesarios para evaluar la viabilidad de este escenario.

3.3.1. ESTRUCTURA Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

En una primera etapa se establece la estructura de la planta de reciclaje y como el ozono juega un rol en la degradación del neumático para posteriormente ser combinado con otros procesos para generar productos comercializables.

En una segunda etapa se establece la localidad en la cual estará ubicado la planta de reciclaje, la cual será evaluada posteriormente en un estudio de mercado para distinguir los beneficios de la localización

3.3.2. ESTUDIO DE MERCADO

El estudio económico de la viabilidad del uso de ozono en una planta de reciclaje de neumáticos fuera de uso comienza con un estudio de mercado partiendo con un análisis de las leyes 20.920 correspondiente a la ley REP, y la ley 20.551 correspondiente a la ley de cierre de faenas. Posteriormente, se realiza un análisis de la demanda en la cual se estudia la importación de neumáticos *Off The Road* y el crecimiento en el uso de estos neumáticos en la industria minera.

El estudio de mercado finaliza con un análisis de oferta de plantas de reciclaje presentes en el país, especialmente las plantas cercanas a la localización establecida para instalar el proyecto estudiado, estableciendo su competencia directa, además de las faenas cercanas que pueden significar en un eventual cliente.

3.3.3. VIABILIDAD DEL PROYECTO

Antes de iniciar la evaluación económica del proyecto se establece la paridad cambiaria la cual indica los precios actuales a la hora de realizar el análisis económico, la viabilidad del proyecto es evaluada en dólares estadounidenses, por lo cual se establece el precio del dólar, el precio de la unidad de fomento y el precio del euro expresados en pesos chilenos.

En una primera instancia, se establecen las inversiones directas e indirectas necesarias para la puesta en marcha del proyecto de reciclaje, en la cual se incluyen los estudios de factibilidad correspondientes considerando que esta evaluación esta realizada en una etapa de pre-factibilidad del proyecto.

Luego de determinar las inversiones, se establecen los gastos operacionales correspondientes al dinero necesario para generar los productos comercializables, incluyendo los gastos de los distintos reactores, barrio cívico, remuneraciones, etc.

Posteriormente se genera un resumen de los CAPEX y OPEX del proyecto, incluyendo la depreciación de los equipos a lo largo del tiempo, a modo de generar un margen operacional que da un indicio de la viabilidad económica del proyecto de reciclaje.

Adicionalmente se genera una opción de financiamiento a modo de disminuir la inversión propia para la puesta en marcha de la planta, dicho financiamiento se considera a un periodo de 10 años con una amortización de la deuda.

Para establecer si el proyecto es económicamente rentable se generan los respectivos flujos de caja a un periodo de 10 años en un escenario sin inversión externa y otro con inversión externa, a modo de obtener los distintos indicadores económicos que nos entregan una visión de la viabilidad económica del proyecto.

3.3.4. ANÁLISIS DE RIESGOS

Se genera un análisis de riesgos del proyecto generando escenarios probables para los precios de venta de los productos comercializables, generando funciones de densidad de probabilidad que dan una variabilidad esperada en los precios mencionados.

Luego de obtener las respectivas funciones de probabilidad, se ve el impacto de esta variabilidad en los precios de venta generando una simulación de 10.000 iteraciones en el *software RISK* de *Paladise* para evaluar los escenarios posibles y como estos pueden afectar a indicadores económicos como el VAN y el TIR, a modo de obtener una visión de como sería la rentabilidad del proyecto en un escenario pocamente probable, pero existente.

Finalmente, se establecen los estadígrafos que permiten saber el riesgo y probabilidad de éxito de la inversión, además del costo de incertidumbre y el costo de irracionalidad.

4 | RESULTADOS

4.1. FASE EXPERIMENTAL

4.1.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO

Los resultados del análisis exploratorio son divididos en dos etapas, una etapa son los ensayos realizados previo a la utilización de un sistema de tensión, y los ensayos exploratorios realizados posterior a la utilización del sistema de tensión.

Previo al sistema de tensión, se utilizan diversos aditivos para verificar su reacción al contacto con el ozono, permitiendo generar una mayor cantidad de radicales libres que aceleran la degradación, sin embargo, todas las pruebas realizadas en este punto fueron fracasadas, obteniendo una capa exterior de una superficie bastante delgada, la cual, al contacto con la mano se retira con facilidad. La variación de tiempo en esta etapa llego a un máximo de 10 horas de exposición a ozono, obteniendo los mismos resultados que una exposición de 30 minutos. La “degradación” experimentada en este punto llego a un máximo de 0,3 %, siendo calculada como la variación de masa que experimenta la muestra en relación con la masa inicial. La degradación mencionada se debe principalmente a la interacción de la muestra con la mano, siendo una masa retirada manualmente y que no varía en el tiempo. Adicional a lo anterior, tampoco fue visible la formación de grietas, lo cual se atribuye principalmente a una fuerza externa que necesariamente debe facilitar la acción del ozono frente a la superficie de contacto.

En relación con los medios acuosos, se realizaron pruebas en medios agitados con una inyección de ozono por la parte inferior de una probeta como puede ser visualizado en la Figura B.11, sin embargo, los resultados fueron similares a lo anterior, llegando a generar una capa externa retirada fácilmente con la mano, independiente del tiempo de exposición al que se somete la muestra.

Posterior a las pruebas fallidas mencionadas anteriormente, y realizadas en probetas, se presenta la metodología utilizada y detallada en el Capítulo 3.2. Lo anterior es principalmente debido a dos motivos, 1) el sistema no era impermeable, lo cual significa una pérdida en la concentración de ozono llegando a niveles de 1,5 ppm en promedio, y 2) la necesidad de crear un sistema funcional, que en base a referencias bibliográficas necesita una fuerza que permita la

formación de grietas.

Inicialmente se crea un recipiente reciclado utilizando un extintor de 10 kg en desuso, el cual tiene conectado dos sistemas de cañerías, de inyección y extracción de ozono, además de una tapa cerrada mediante pernos y sellada con una empaquetadura. En la Figura B.18 es posible observar el reactor utilizado, con sus respectivas características mencionadas. En la Figura B.19 es posible observar la primera experiencia exitosa en la degradación de una muestra, la cual fue tensionada mediante un resorte genérico, expuesta a ozono durante 25 minutos.

Posterior a la primera situación de éxito frente a la degradación, se crea un sistema de tensión mediante pernos mencionado anteriormente en la metodología de este proyecto, dicho sistema se basa en dos lados de sujeción, uno fijo y otro móvil, siendo el lado de sujeción móvil el que aporta la tensión al sistema y a la muestra el cual posteriormente será determinado mediante la Ley de elasticidad de *Hooke*. En la Figura B.20 es posible observar el sistema creado mediante el reciclaje de utensilios de metal encontrados en el hogar y soldados.

Posterior a la elaboración del sistema de tensión, se procede a generar pruebas exploratorias del tiempo requerido para fracturar la muestra de neumático, estableciendo en este punto la utilización de ozono gaseoso sin aditivos ni medios acuosos debido a las experiencias realizadas anteriormente. Cabe destacar que, si bien se realizaron pruebas exploratorias utilizando aditivos y medios acuosos, estas no son concluyentes de no servir como acelerantes en el proceso de degradación debido a que no fueron probadas mediante un sistema de tensión que aumente la generación de grietas en las muestras, grietas que son utilizadas para la penetración del ozono.

El resultado de las pruebas exploratorias con el sistema de tensión elaborado puede ser vistas en la Tabla 4.1

Tabla 4.1: Tiempo de fracturamiento de pruebas exploratorias.

N Muestra	Peso [grs]	Alto [cm]	Largo [cm]	Ancho [cm]	Tensión [kN]	Concentración O ₃ [ppm]	Tiempo de fracturamiento [min]	Promedio [min]
1	56,06	8,38	4,52	1,68	20	11,5	191	183,5
3	56,48	8,77	4,81	1,72	20	11,5	186	
11	53,82	7,35	4,95	1,83	20	11,5	190	
14	53,28	9,1	4,28	1,64	20	11,5	167	
18	68,83	8,01	5,42	1,93	20	5,7	363	364
25	58,48	8,51	4,46	1,94	20	5,7	344	
27	57,78	8,25	4,52	1,62	20	5,7	376	
33	62,68	9,7	4,79	1,77	20	5,7	373	

Dentro de este análisis exploratorio es necesario aclarar que se trabaja con dos concentraciones las cuales se lograron mantener de forma estable durante el desarrollo del experimento, la primera es la concentración baja de 5,7 ppm y luego la concentración alta de 11,5 ppm. Dentro de estas pruebas se trabajó al nivel máximo de tensión, correspondiente a 20 kN, tensión correspondiente a un estiramiento de 2 cm con un módulo de *Young* de 1 MPa utilizando la Ecuación 3.1.

Existen dos promedios relevantes que corresponden al tiempo en que el fracturamiento equivale al 100 %, fracturamiento determinado con la Ecuación 3.2. El primer promedio corresponde al nivel máximo de tensión y

concentración, promediando un tiempo de 183,5 minutos lo cual es equivalente a un aproximado de 3 horas. Con respecto al nivel de baja concentración, el tiempo promedio de fracturamiento es de 364 minutos, correspondientes a un tiempo cercano a las 6 horas.

Dicho esto, posteriormente se realiza un diseño factorial para obtener el fracturamiento variando los niveles de concentración y tensión en un tiempo de 3 horas, correspondiente al promedio de fracturamiento total con la tensión y concentración de ozono mayor.

Adicionalmente, se realizan pruebas sin ozono para verificar la incidencia del gas en la degradación, teniendo como resultado un fracturamiento cercano a 0 en tres pruebas realizadas.

4.1.2. DISEÑO FACTORIAL

Para la creación del diseño factorial a utilizar se utiliza el *software* planteado en la metodología, el cual permite seleccionar un diseño factorial completo que puede ir desde 2 a 15 factores. En este ensayo se utilizan dos factores que son la concentración de ozono y la tensión a la cual se somete la muestra. Para el caso de la concentración se tienen dos niveles, los cuales son de 5,7 ppm y 11,5 ppm respectivamente. Por su parte, la tensión inicialmente es establecida como una variación de la longitud de la muestra, teniendo cuatro niveles, los cuales son 0,5 cm, 1 cm, 1,5 cm y 2 cm respectivamente. En esta etapa se toma la decisión de generar tres replicas o repeticiones del ensayo, con la finalidad de disminuir el error que puede presentar el factor humano y otras condiciones que no son evaluadas en el proyecto.

En la Tabla 4.2 es posible observar la cantidad de corridas generadas por el programa considerando los dos niveles de concentración y los cuatro niveles de tensión para las tres replicas seleccionadas.

Tabla 4.2: Diseño factorial completo de dos factores.

OrdenCorrida	Replica	Bloques	Concentración [Nivel]	Tensión [Nivel]
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	1	1	3
4	1	1	1	4
5	1	1	2	1
6	1	1	2	2
7	1	1	2	3
8	1	1	2	4
9	2	1	1	1

OrdenCorrida	Replica	Bloques	Concentración [Nivel]	Tensión [Nivel]
10	2	1	1	2
11	2	1	1	3
12	2	1	1	4
13	2	1	2	1
14	2	1	2	2
15	2	1	2	3
16	2	1	2	4
17	3	1	1	1
18	3	1	1	2
19	3	1	1	3
20	3	1	1	4
21	3	1	2	1
22	3	1	2	2
23	3	1	2	3
24	3	1	2	4

4.1.3. CLUSTERING DE MUESTRAS

Posterior a la decisión del diseño factorial a utilizar, el cual cuenta con un total de 24 experiencias variando los factores, es necesario generar una elección de los grupos de muestras para generar una separación de la forma mas representativa posible. Como fue descrito en la etapa anterior, existen 3 repeticiones para el mismo ensayo, teniendo cada repetición un grupo total de 8 muestras. Para esta etapa se genera un agrupamiento de un enlace completo utilizando el Alto y Largo de las muestras para generar dichos agrupamientos. Lo anterior es debido a que existen restricciones directamente relacionadas con el reactor utilizado y mencionado anteriormente, en términos de distancia. Si bien existen otras características que pueden representar a la muestra, como lo son el peso y el ancho, dichas características no son utilizadas para este agrupamiento debido a la relación directa que tienen con la medida del alto y largo, considerando que la densidad de todas las muestras es similar.

En la Tabla B.2 es posible observar los pasos en la generación de agrupamientos y sus respectivas semejanzas.

Luego de los pasos de amalgamación realizados por el *software MINITAB 19* se genera un total de 3 grupos o conglomerados, los cuales pueden ser observados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Partición final de agrupamiento de las muestras.

	Número de muestras	Distancia promedio desde el centroide	Distancia máxima desde el centroide
Conglomerado1	9	0,396486	0,84916
Conglomerado2	15	0,361235	0,67846
Conglomerado3	14	0,457147	1,15062

Siendo el conglomerado que agrupa mas muestras, el número dos, teniendo un total de 15 muestras.

Con respecto a los centroides de cada conglomerado es posible observarlos en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Centroides de grupo del agrupamiento de las muestras.

Variable	Conglomerado1	Conglomerado2	Conglomerado3	Centroide principal
Alto [cm]	8,17889	10,1840	9,42286	9,42868
Largo [cm]	4,76556	4,6607	4,95643	4,79447

Adicionalmente, es posible observar las distancias entre los centroides de cada conglomerado en la Tabla 4.5, para luego generar el dendrograma del agrupamiento.

Tabla 4.5: Centroides entre los respectivos grupos de muestras.

	Conglomerado1	Conglomerado2	Conglomerado3
Conglomerado1	0,00000	2,00785	1,25853
Conglomerado2	2,00785	0,00000	0,81659
Conglomerado3	1,25853	0,81659	0,00000

Finalmente, es posible observar el dendrograma correspondiente a los agrupamientos generados y sus respectivas similitudes, el cual puede ser visto en la Figura B.1.

Posterior a la generación de agrupamientos, se toman muestras de los conglomerados 2 y 3 para ser utilizados en el diseño factorial, debido a que presentan un largo manejable similar que acomoda si colocación en el sistema de tensión, siendo los del conglomerado 1 muy pequeños, y los mas lejanos del conglomerado 3 muy grandes. Dicho lo anterior, en la Tabla 4.6 es posible observar las muestras utilizadas para cada experiencia del diseño factorial propuesto anteriormente.

Tabla 4.6: Muestras seleccionadas para el diseño factorial.

	Tensión 1	Tensión 2	Tensión 3	Tensión 4	Prueba
Concentración 1	7	10	37	4	1
Concentración 2	22	28	5	31	
Concentración 1	13	20	29	36	2
Concentración 2	2	30	8	19	
Concentración 1	16	17	34	6	3
Concentración 2	9	15	21	24	

4.1.4. CÁLCULO DE LA TENSIÓN

Para el cálculo de la tensión se utiliza la Ecuación 3.1, utilizando un módulo de *Young* igual a 1 y variando las distancias, las cuales pueden ser observadas en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Tensiones a las cuales son sometidas las muestras.

Variación lineal [cm]	Módulo de <i>Young</i> [MPa]	Tensión [kN]
0,5	1	5
1	1	10
1,5	1	15
2	1	20

4.1.5. APLICACIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL

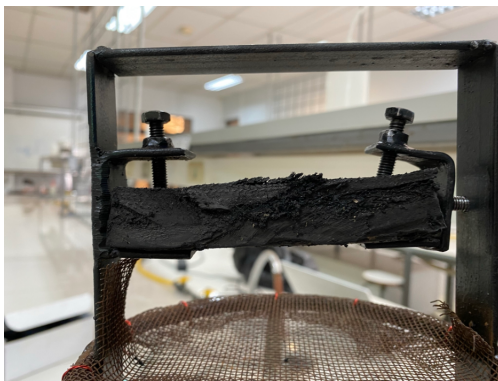
Luego de obtener los cuatro niveles de tensión, y los dos niveles de concentración los cuales son 5,7 y 11,5 ppm respectivamente, es posible obtener los resultados de la aplicación del diseño factorial luego de efectuar todas las experiencias.

En la Tabla 4.8 es posible observar los distintos niveles de fracturamiento obtenidos luego de las diversas experiencias, calculados de acuerdo a la Ecuación 3.2.

Tabla 4.8: Resultados de fracturamiento.

	5 kN	10 kN	15 kN	20 kN	Replica
5,7 ppm	9 %	24 %	36 %	46 %	1
11,5 ppm	19 %	43 %	83 %	100 %	
5,7 ppm	7 %	19 %	31 %	48 %	2
11,5 ppm	17 %	45 %	76 %	94 %	
5,7 ppm	8 %	21 %	30 %	42 %	3
11,5 ppm	15 %	31 %	72 %	98 %	

En la Figura 4.1 es posible observar distintos niveles de fracturamiento en las muestras.



(a) Muestra 22, fracturamiento al 19 %.



(b) Muestra 28, fracturamiento al 43 %.



(c) Muestra 5, fracturamiento al 83 %.



(d) Muestra 31, fracturamiento al 100 %.

Figura 4.1: Fotografías de distintos niveles de fracturamiento.

4.1.5.1. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL

Luego de aplicar el diseño factorial en el *software MINITAB19*, es posible obtener los siguientes resultados:

En la Tabla 4.9 es posible observar los coeficientes del modelo factorial generado.

Tabla 4.9: Coeficientes del modelo factorial.

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0,42349	0,00798	53,09	0	
Concentración					
5.7	-0,15493	0,00798	-19,42	$1,5 \times 10^{-12}$	1,00
Tensión					
5	-0,2972	0,0138	-21,51	$3,1 \times 10^{-13}$	1,50
10	-0,1170	0,0138	-8,47	$2,6 \times 10^{-7}$	1,50
15	0,1243	0,0138	9,00	$1,1 \times 10^{-7}$	1,50
Concentración*Tensión					
5,7-5	0,1097	0,0138	7,94	$6,1 \times 10^{-7}$	1,50
5,7-10	0,0641	0,0138	4,64	$2,7 \times 10^{-4}$	1,50
5,7-15	-0,0689	0,0138	-4,99	$1,3 \times 10^{-4}$	1,50

En la Tabla 4.10 es posible observar el resumen del modelo aplicado.

Tabla 4.10: Resumen del modelo factorial.

Desviación	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pronosticado)
0,0390797	98,78 %	98.24 %	97.25 %

Luego del modelo factorial generado, es posible observar la Ecuación de la regresión en 4.1.

$$\begin{aligned}
 \text{Fracturamiento} = & 0,42349 - 0,15493C_1 + 0,15493C_2 \\
 & - 0,2972T_1 - 0,1170T_2 + 0,1243T_3 \\
 & + 0,2899T_4 + 0,1097C_1 * T_1 \\
 & + 0,0641C_1 * T_2 - 0,0689C_1 * T_3 \\
 & - 0,1049C_1 * T_4 - 0,1097C_2 * T_1 \\
 & - 0,0641C_2 * T_2 + 0,0689C_2 * T_3 \\
 & + 0,1049C_4 * T_4
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Donde :

C_n : Concentración en el nivel n.

T_n : Tensión en el nivel n.

En la Tabla 4.11 es posible observar el análisis de la varianza obtenido en la interacción de ambos factores.

Tabla 4.11: Análisis de la varianza del modelo.

Fuente	GL	SC Ajust.	CM Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo general	7	1,97638	0,282340	184,87	$4,3 \times 10^{-14}$
Modelo lineal	4	1,78499	0,446249	292,20	$9,8 \times 10^{-15}$
Modelo lineal Concentración	1	0,57608	0,576080	377,21	$1,5 \times 10^{-12}$
Modelo lineal Tensión	3	1,20891	0,402971	263,86	$7,9 \times 10^{-14}$
Interacciones de 2 términos	3	0,19139	0,063795	41,77	$8,5 \times 10^{-8}$
Concentración*Tensión	3	0,19139	0,063795	41,77	$8,5 \times 10^{-8}$
Error	16	0,02444	0,001527		
Total	23	2,00082			

Antes de generar los diagramas del modelo, se realiza un ajuste mediante un diagnóstico en observaciones consideradas poco comunes, estas observaciones pueden ser vistas en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes.

Orden de corrida	Fracturamiento	Ajuste	Resid	Resid est.
22	0,3114	0,3973	-0,0859	-2,69

Finalmente, es posible observar los distintos diagramas generados por el modelo factorial en las Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, los cuales son analizados y comentados en la sección de análisis de resultados.

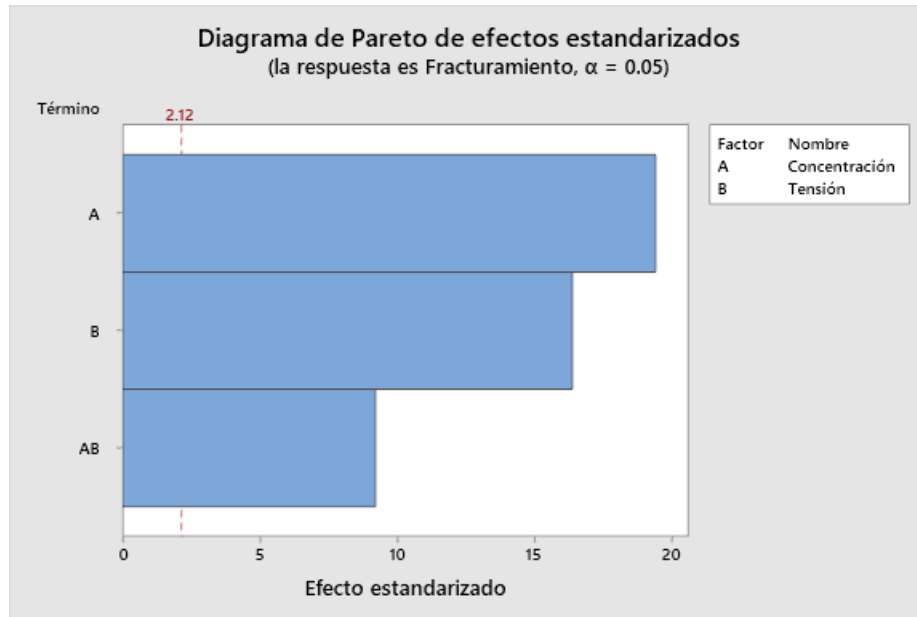


Figura 4.2: Diagrama de Pareto del modelo.

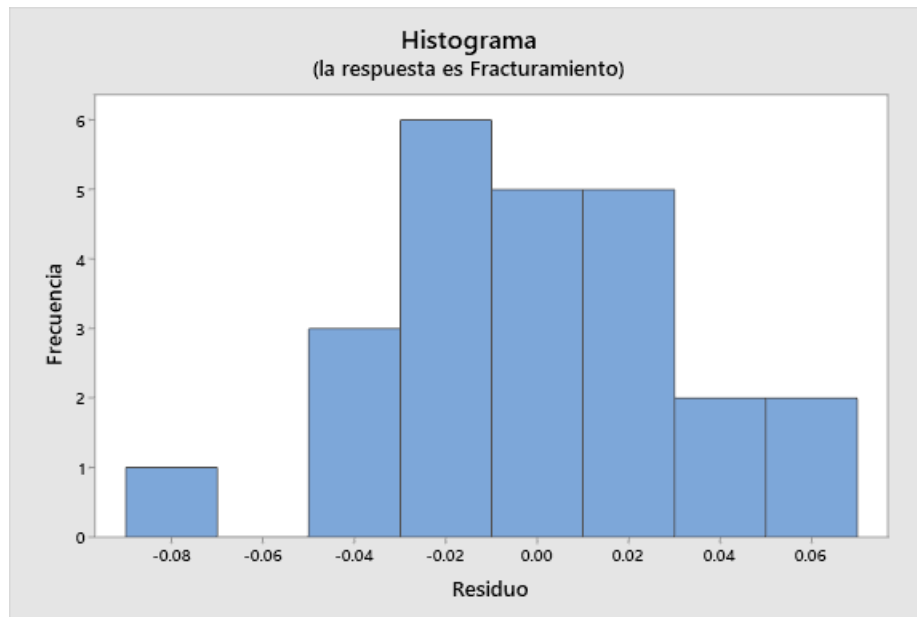


Figura 4.3: Histograma de la frecuencia y el residuo.

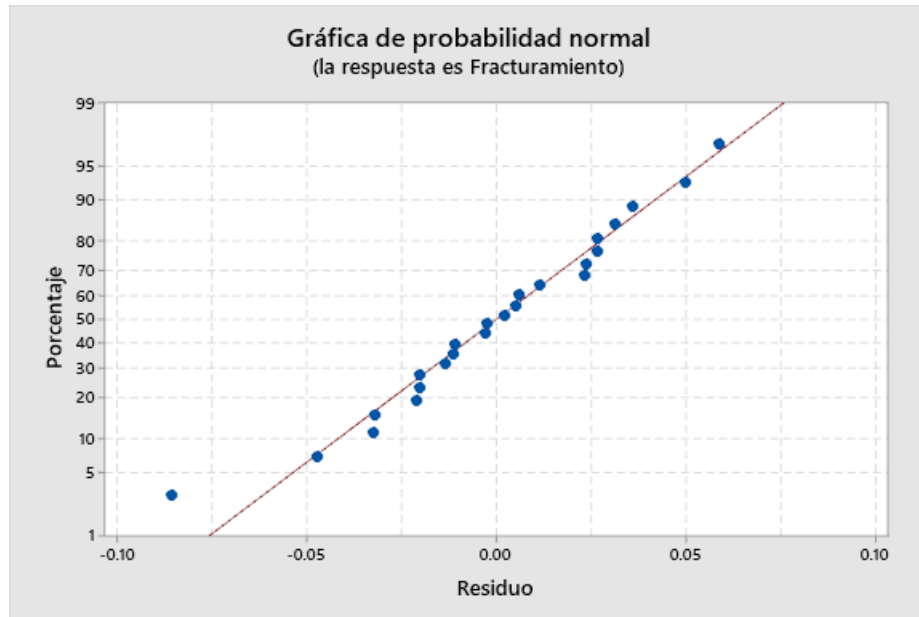


Figura 4.4: Gráfica de probabilidad normal del modelo.

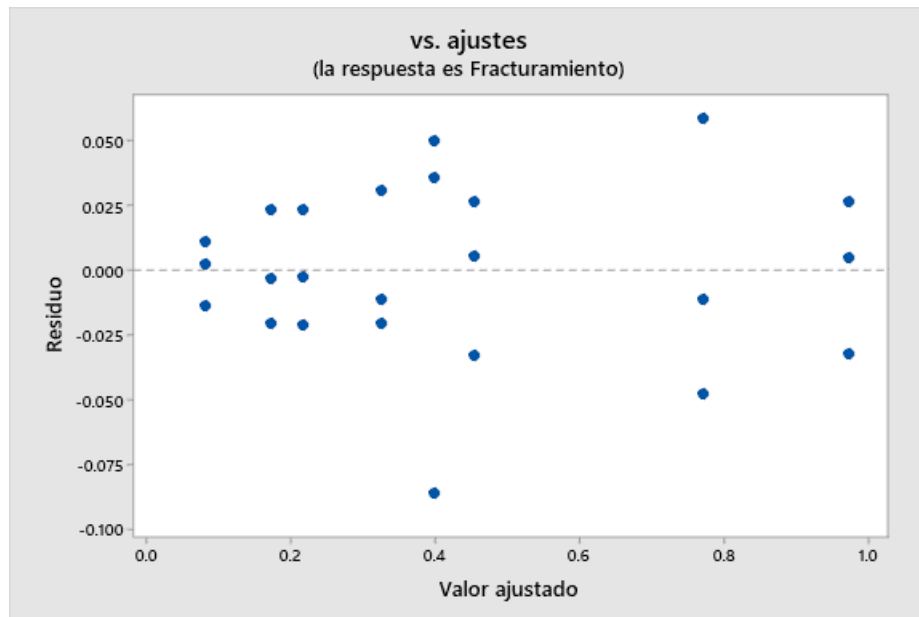


Figura 4.5: Gráfica del residuo y el valor ajustado del modelo.

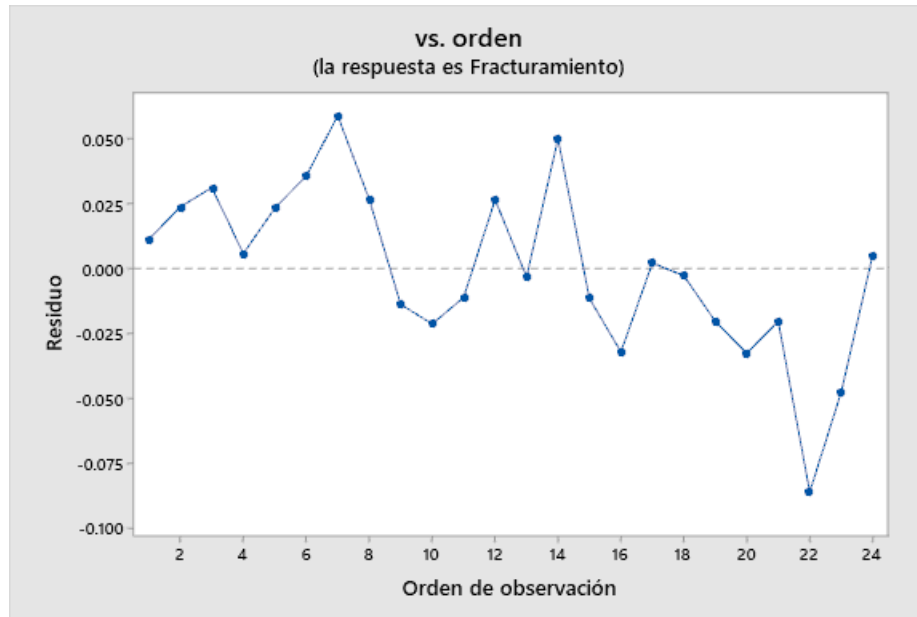


Figura 4.6: Gráfica del residuo y el orden de observación.

4.1.5.2. GRÁFICAS PARA EL FRACTURAMIENTO

Luego de aplicar el diseño factorial para el fracturamiento, es posible obtener las gráficas del mismo, las cuales pueden ser observadas en las Figuras 4.7 y 4.8.

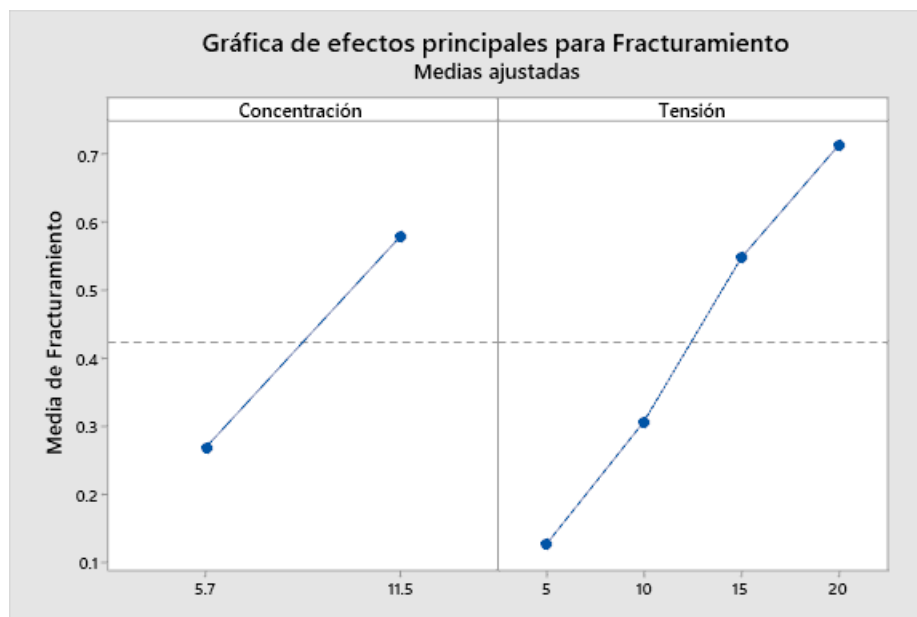


Figura 4.7: Gráfica de medias ajustadas del fracturamiento ante ambos factores.

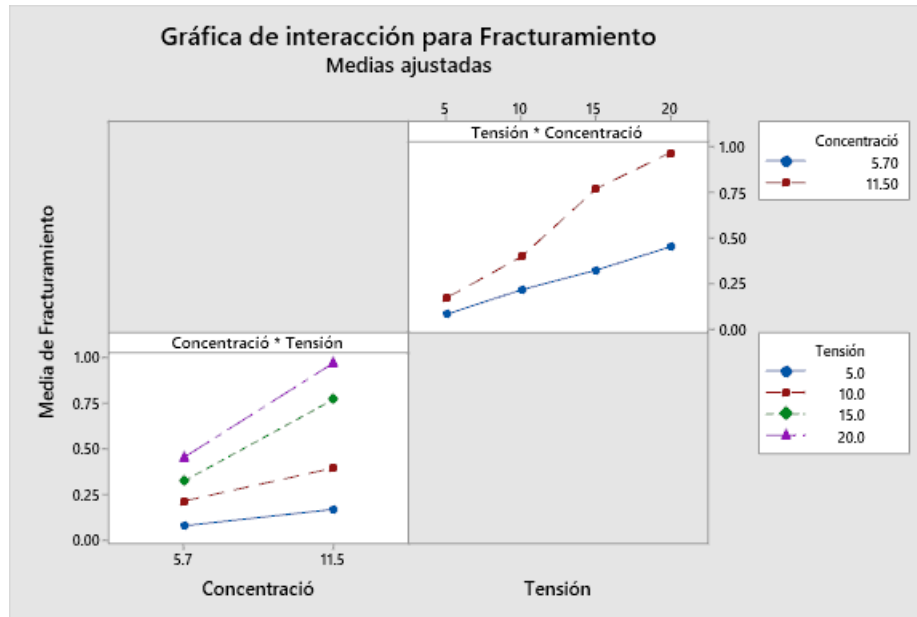


Figura 4.8: Gráfica de interacción de medias ajustadas para ambos factores.

4.2. FASE ECONÓMICA

Si bien el proceso de degradación mediante Ozono puede generar caucho en granulometrías bajas, esto debe ser estudiado en una forma industrial, por lo cual se consideran los costos necesarios para este proyecto con respecto a la factibilidad técnica. El Ozono se considera como un paso previo a la pirólisis, proceso que genera productos comercializables de mayor valor que el caucho molido, lo cual aumenta la rentabilidad de una eventual planta de reciclaje. En esta etapa se genera un estudio económico de pre-factibilidad, el cual toma como referencia las cotizaciones generadas por *Metaproject* para generar un flujo de caja para evaluar la rentabilidad del proyecto.

4.2.1. ESTRUCTURA DE LA PLANTA

El servicio de reciclaje propuesto en este proyecto consiste en una reducción de tamaño mediante ozono para la posterior utilización en un reactor de pirólisis de los trozos obtenidos. Dicho proceso genera productos comercializables que dan la rentabilidad al negocio. En la Figura 4.9 es posible observar el diagrama propuesto para la planta de reciclaje mencionada, obteniendo un 45 % de aceite pirolítico, un 30 % de Negro de Humo (*Carbón Black*), un 15 % de Acero y un 5 % de Gas, el cual es recirculado al proceso para alimentar el reactor de pirólisis.

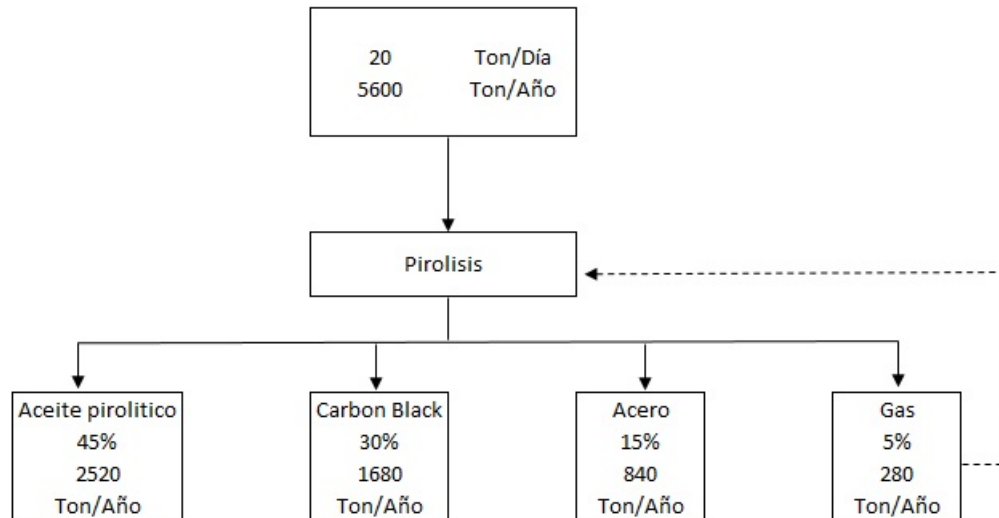


Figura 4.9: Diagrama propuesto para la planta de reciclaje.

En la Tabla 4.13 es posible observar el resumen de los productos obtenidos en la planta de reciclaje de 20 ton/día considerando 280 días laborales efectivos.

Tabla 4.13: Resumen de productos de la pirólisis.

Producto	Ton/Año
NFU	5600
Aceite pirolítico	2520
Carbón <i>Black</i>	1680
Acero	840
Gas	280

4.2.2. LOCALIZACIÓN

La corporación Alta Ley estableció un inventario de la cantidad total de NFU que existe actualmente en acopios (Tabla 4.14), para lo cual se hizo una separación de cuatro zonas: Tarapacá, Antofagasta-Norte, Antofagasta-Sur y Valparaíso-Metropolitana-O'Higgins, estableciendo la capacidad máxima anual que debería contar cada planta establecida por zona.

Tabla 4.14: Inventario de Neumáticos Fuera de Uso (Alta Ley, 2021).

Zona	Región	Compañías Mineras	Total NFU (ton)	Tamaño planta (ton)
1	Tarapacá	Cerro Colorado Quebrada Blanca Collahuasi	73.954	10.000
2	Antofagasta-Norte	Antucoya El Abra Radomiro Tomic Chuquicamata Ministro Hales Spence	148.334	20.000
3	Antofagasta-Sur	Sierra Gorda Centinela Gabriela Mistral Lomas Bayas Zaldívar Escondida	170.868	20.000
4	Valparaíso Metropolitana O'Higgins	El Soldado Andina Los Bronces El Teniente	53.120	10.000

De acuerdo a Alta Ley, en las zonas 1 y 4 el negocio sería atractivo para un tercero a través de la modalidad de servicio, siempre y cuando se pague un costo o una tasa ecológica adicional para el tratamiento de los residuos, en

cambio, en las zonas 2 y 3 el servicio de tratamiento y disposición es económicamente viable.

La comuna de Sierra Gorda ubicada en la Región de Antofagasta es cercana a todos los centros relevantes de extracción de Cobre, existen alrededor de 49 faenas mineras funcionando en la zona de Sierra Gorda, lo cual genera un polo de gran interés para el reciclaje de neumáticos fuera de uso en la minería regional.

En la Figura 4.10 es posible observar las distancias de las principales faenas mineras en relación a Sierra Gorda.

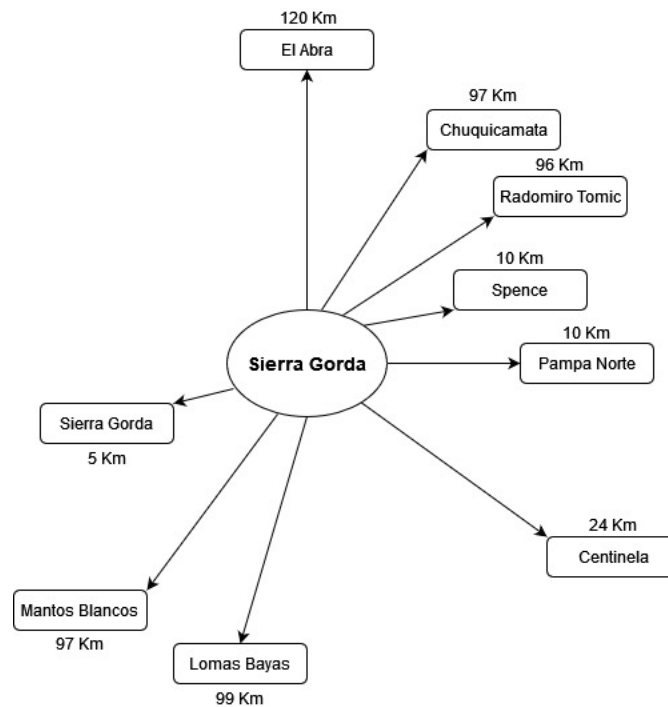


Figura 4.10: Distancias a las principales faenas mineras.

La concentración de neumáticos fuera de uso generados por año en la industria minera se encuentra bajo los 100 km de distancia desde Sierra Gorda, por lo cual se considera como una excelente localización para establecer una planta de reciclaje.

4.2.3. ESTUDIO DE MERCADO

4.2.3.1. ANÁLISIS LEGAL

La Ley REP (Ley 20.920) tiene por objetivo disminuir la cantidad de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje u otro tipo de valorización. El reglamento de esta ley considera metas de valorización a partir del año 2023, lo cual implica que el 25 % de los neumáticos fuera de uso utilizados el año 2022 deben ser reciclados. Al cuarto año de

vigencia de esta ley, la industria minera debe realizar un reciclaje del 75 % de sus neumáticos fuera de uso declarados el año anterior, llegando al sexto año dicho porcentaje debe ser de un 100 %.

Con respecto a la ley 20.551 del Ministerio de Minería, se considera dentro del plan de cierre de faenas mineras la integración y ejecución del conjunto de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos que derivan del desarrollo de la industria minera. Mencionado lo anterior, las faenas mineras deben considerar la eliminación de sus inventarios en forma ambientalmente amigable en un plazo razonable antes de su cierre.

4.2.3.2. ANÁLISIS DE LA DEMANDA

La importación de neumáticos mineros y de construcción aumento un 15,6 % los últimos cuatro años, seguido por un aumento del 51,8 % en la generación de neumáticos fuera de uso.

Según Cochilco [22], hasta el año 2013 existió un aumento en las importaciones de neumáticos OTR, llegando a un total de US \$ 421 millones CIF, para luego caer hasta los US \$ 196 millones CIF en el año 2016, y retomar alcanzado los US \$ 341 millones CIF en el año 2019.

Existen dos principales fabricantes de neumáticos utilizados en camiones mineros de alto tonelaje, los cuales representan el 54 % y 41 % del total de unidades importadas, las empresas fabricantes principales son Michelin y *Bridgestone*. Los neumáticos importados hacia Chile provienen principalmente de Estados Unidos y Japón, acaparando el 90 % de importaciones en el año 2019 [22].

Chile no cuenta con plantas de fabricación de neumáticos de los tamaños requeridos en la minería, por lo cual es necesario importar el 100 % de ellos. En la Figura 4.11, gráfico elaborado por Cochilco [22], es posible observar el detalle de los volúmenes importados hacia Chile. Cabe destacar que los neumáticos incluidos en este estudio son los siguientes: 45/65 R45, 27.00 R49, 33.00 R51, 37.00 R57, 42/90 R57, 40.00 R57, 46/90 R57, 53/80 R63, 56/80 R63, 59/80 R63.

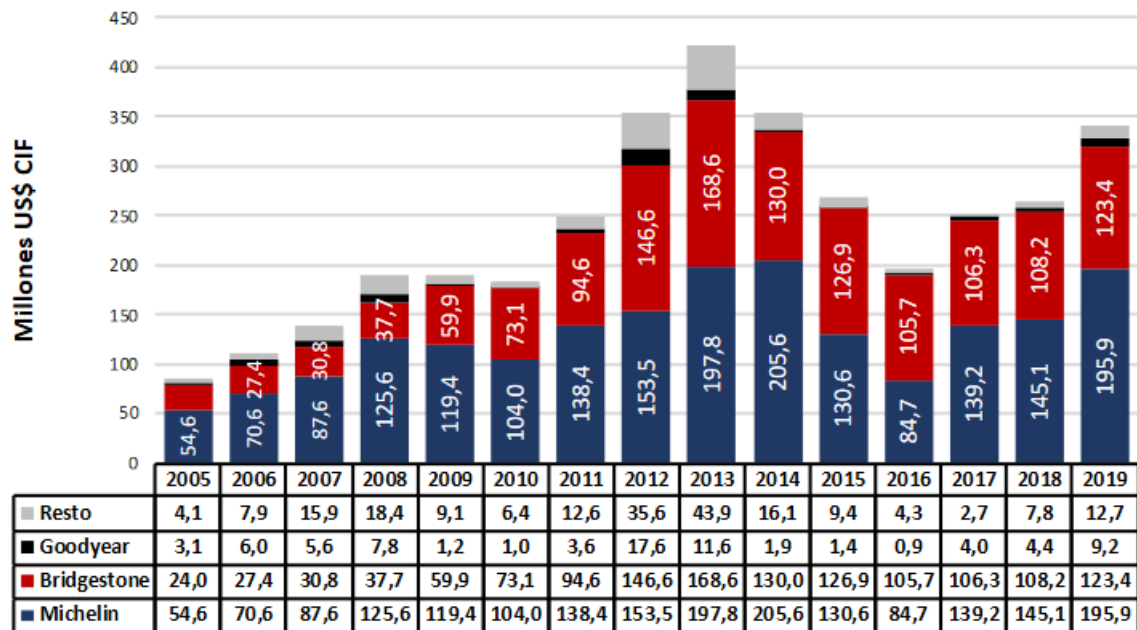


Figura 4.11: Importaciones de neumáticos OTR por marca 2005-2019.

En el año 2019 las importaciones de las dos marcas principales crecieron en conjunto un 26 %, siendo principalmente neumáticos R63, como puede ser observado en la Figura 4.12

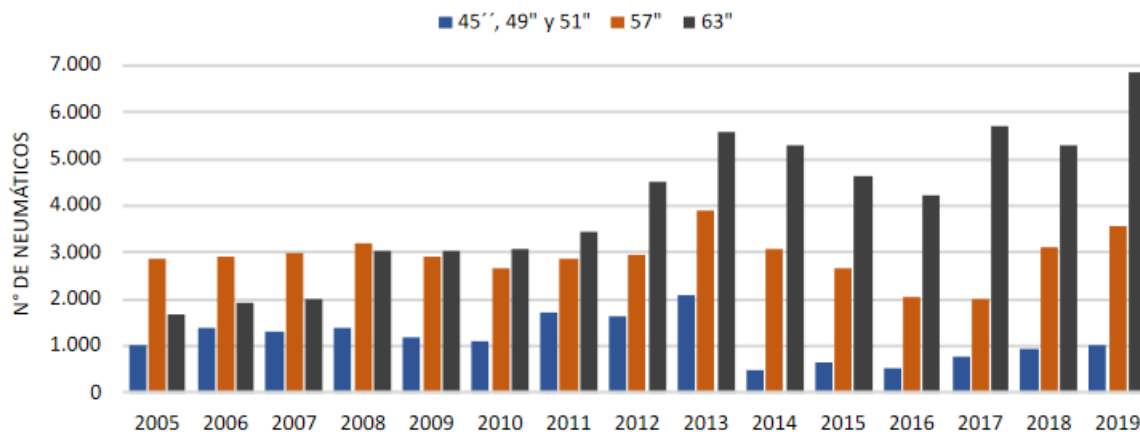


Figura 4.12: Neumáticos OTR importados según dimensión.

4.2.3.3. ANÁLISIS DE LA OFERTA

Las principales ofertas con respecto al reciclaje de neumáticos es desarrollada por empresas relacionadas al giro de los neumáticos como *KalTire* y *Bailac*, junto a *Michelin* desarrollan procesos de reciclaje basados en la pirólisis y trituración mecánica. En la Tabla 4.15 es posible observar las principales plantas de reciclaje existentes actualmente, además del cobro correspondiente a la tasa de eliminación. La planta generada por *Bailac* esta ubicada en Iquique, por

lo cual no supone una competencia directa en la localización cercana a Sierra Gorda.

Tabla 4.15: Plantas ubicadas en la segunda región.

Empresa	Capacidad anual [Ton]	Tasa de eliminación [US \$ /Ton]	Proceso	Ubicación
KalTire	6.000	450	Pirólisis	Antofagasta
ECOtr	8.000	Desconocido	Pirólisis	Antofagasta
Michelin	25.000	Desconocido	Pirólisis	Antofagasta

4.2.4. VIABILIDAD ECONÓMICA

4.2.4.1. PARIDAD CAMBIARÍA

En la Tabla 4.16 es posible observar los indicadores económicos diarios utilizados al momento de desarrollar la evaluación económica del proyecto. El proyecto está evaluado en dólares estadounidenses.

Tabla 4.16: Indicadores económicos diarios actuales.

Indicador	Valor actual [CLP]
Unidad de Fomento (UF)	30.345,48
Dolar Estadounidense (US \$)	804,32
Euro	933,84

4.2.4.2. INVERSIONES

Se consideran dos tipos de inversiones, directas e indirectas, las inversiones directas son las correspondientes a la puesta en marcha del proceso de reciclaje, por su parte, las inversiones indirectas corresponden a las inversiones necesarias previas a la puesta en marcha del proyecto.

En la Tabla 4.17 es posible observar las inversiones directas que se deben realizar. Para este caso se utiliza un reactor de pirólisis evaluado por la empresa *Metaproject*, además de un precio estimativo para un eventual reactor de ozonificación a un valor propuesto que eventualmente podría disminuir luego de realizar un estudio de factibilidad técnica.

Tabla 4.17: Inversiones directas.

Item	Cantidad	Precio [US \$]	Total [US \$]	Años depreciación	Depreciación [US \$ /Año]
Barrio cívico	1	\$ 100.000	\$ 100.000	10	\$ 10.000
Proyecto eléctrico	2	\$ 56.158	\$ 112.316	10	\$ 11.232
Galpón almacenamiento	1	\$ 87.357	\$ 87.357	10	\$ 8.736
Instalación	1	\$ 56.708	\$ 56.708	10	\$ 5.671
Planta Ozonizadora 20 Ton/Día	1	\$ 100.000	\$ 100.000	10	\$ 10.000
Planta Pirolisis 20 Ton/Día	1	\$ 360.867	\$ 360.867	10	\$ 36.087
Generadores eléctricos	1	\$ 149.755	\$ 149.755	10	\$ 14.975
Línea de agua	1	\$ 37.439	\$ 37.439	5	\$ 7.488
Estanques de Aceite Pirofítico	6	\$ 35.000	\$ 210.000	5	\$ 42.000
Retroexcavadora	1	\$ 170.000	\$ 170.000	10	\$ 17.000
Camioneta	2	\$ 28.703	\$ 57.406	10	\$ 5.741
Sistema contra incendios	1		\$ 100.000		
Maquinaria (otros)	1		\$ 51.552		
Herramientas (otros)	1		\$ 30.931		
TOTAL			\$ 1.624.331		\$ 168.929
Reinversión 5 años			\$ 247.439		

En la Tabla 4.18 es posible observar las inversiones indirectas necesarias previo a la puesta en marcha del proyecto. Dentro de las inversiones indirectas se considera un estudio de la viabilidad del uso del Ozono como degradador de neumáticos a nivel industrial.

Tabla 4.18: Inversiones indirectas.

Item	Costo [US \$]
Estudio de Ingeniería	\$ 150.000
Inspección técnica y gerenciamiento	\$ 60.000
Estudio técnico ozonificación industrial	\$ 200.000
Capital de trabajo	\$ 250.000
Comisionamiento	\$ 60.000
Estudio Ambiental	\$ 50.000
TOTAL	\$ 770.000

Finalmente, se obtiene una inversión total de US\$ 2.144.331 para el proyecto.

4.2.4.3. GASTOS OPERACIONALES

Dentro de los gastos operacionales de la planta se consideran cuatro ejes, consumo energético, consumo de combustible, consumo de oxígeno del reactor de ozono, gasto en remuneraciones y arriendo del terreno en Sierra Gorda.

El consumo energético corresponde principalmente al uso de del reactor de pirólisis y el reactor de Ozono. El consumo energético general de la planta y el barrio cívico está considerado más adelante en el resumen del CAPEX.

En la Tabla 4.19 es posible observar el consumo energético de la planta de reciclaje.

Tabla 4.19: Resumen del consumo energético de la planta de reciclaje.

Item	kW	US \$ /Kw	Hrs/Mes	US \$ /Mes	US \$ /Año
Reactor Pirólisis	48	0,18	192	\$ 1.659	\$ 19.907
Reactor Ozono	12	0,18	144	\$ 311	\$ 3.732
TOTAL				\$ 1.970	\$ 23.639

En la Tabla 4.20 es posible observar el consumo en combustible de la planta de reciclaje separado en los componentes del reactor de pirólisis y las camionetas utilizadas para el traslado.

Tabla 4.20: Resumen del consumo de combustible.

Item	Cantidad	Lts/Hr	Kms	Km/Lt	Hrs/Dia	Ttl Lts / Mes	Factor	Ttl Lts / Mes	US \$ /Lt	US \$ /Mes	US \$ /Año
Quemadores R.Pirolisis	10	85			3	61200	0,8	76500	0,31	\$ 23.715	\$ 284.580
Horquillas R.Pirolisis	1	20			4	80			0,79	\$ 63	\$ 758
Camionetas	2		250	12		6000			0,79	\$ 4.740	\$ 56.880
TOTAL										\$ 28.518	\$ 342.218

El consumo de oxígeno del reactor de Ozono esta fijado en un costo anual de US \$ 100.000, considerando un generador de 50 g/h.

El costo de las remuneraciones puede ser visto en detalle en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21: Resumen de las remuneraciones.

Item	Bruto US \$	Cantidad	US \$ /Mes	US \$ /Año
Jefe de Planta	\$ 4.300	1	\$ 4.300	\$ 51.600
Jefe de Turno	\$ 2.250	3	\$ 6.750	\$ 81.000
Tecnico	\$ 1.500	10	\$ 15.000	\$ 180.000
Prevención	\$ 1.800	1	\$ 1.800	\$ 21.600
Aseo	\$ 400	2	\$ 800	\$ 9.600
Seguridad	\$ 400	1	\$ 400	\$ 4.800
Generales / Bodega	\$ 1.050	1	\$ 1.050	\$ 12.600
ITO	\$ 2.000	1	\$ 2.000	\$ 24.000
Administración	\$ 2.500	1	\$ 2.500	\$ 30.000
TOTAL		21	\$ 34.600	\$ 415.200

Con respecto al arriendo del terreno, está considerado un arriendo mensual de US \$ 3.000 a bienes nacionales con derecho a compra a los 5 años, generando un costo anual de US \$ 36.000 por concepto de arriendo.

4.2.4.4. CAPEX Y OPEX

Luego de la obtención de las inversiones y gastos operacionales, es posible obtener el resumen del CAPEX y OPEX.

El resumen del CAPEX puede ser observado en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22: Resumen del CAPEX.

Item	US \$
Inversión Directa	\$ 1.624.331
Inversión Indirecta	\$ 770.000
Reinversión 5 años	\$ 247.439
TOTAL	\$ 2.641.770

En la Tabla 4.23 es posible observar el resumen del OPEX.

Tabla 4.23: Resumen del OPEX.

Item	US \$ /Año
Consumo energético	\$ 23.639
Consumo combustible	\$ 342.218
Remuneraciones	\$ 415.200
Arriendo	\$ 36.000
EPP	\$ 20.000
Mantenciones	\$ 20.000
Capacitaciones	\$ 45.000
Lavandería	\$ 8.000
Alimentación	\$ 30.000
Seguridad privada	\$ 45.000
Gastos de viajes	\$ 20.000
Químicos filtros	\$ 45.000
Consumo O2	\$ 100.000
Administrativos	\$ 22.000
Traslado personal	\$ 22.000
Marketing	\$ 10.000
Depreciación	\$ 168.929
Otros	\$ 50.000
TOTAL ANUAL	\$ 1.422.986
Costos fijos	\$ 618.200
Costos variables	\$ 635.857
TOTAL ANUAL COSTOS FIJOS Y VARIABLES	\$ 1.254.057

4.2.4.5. INGRESOS

Los ingresos del negocio se dividen en dos segmentos: 1) los productos obtenidos por la pirólisis que son comercializables, entre los cuales están el aceite pirolítico, el negro de humo y el acero; 2) la tasa de eliminación hacia los clientes por eliminar el pasivo ambiental que genera los neumáticos fuera de uso.

El precio de venta del aceite pirolítico se define en un precio de CLP \$ 282 el Kg, el negro de humo (*Carbón Black*) en un valor de CLP \$ 65 el Kg, y el acero se define a un precio de venta de CLP \$ 100 el Kg. En la Tabla 4.24 es posible observar el resumen de los valores de venta de los productos de la pirólisis en dólares estadounidenses.

Tabla 4.24: Resumen de precios por la venta de los productos generados en la pirólisis.

Ítem	Ton/Año	US \$ /ton	US \$ /Año
Aceite Pirolítico	2520	\$ 351	\$ 883.529
Negro de Humo	1680	\$ 81	\$ 135.767
Acero	840	\$ 124	\$ 104.436
TOTAL			\$ 1.123.732

La tasa ecológica de eliminación de pasivos ambientales se define a un precio de CLP \$ 250 el Kg, obteniendo un total de US \$ 1.740.601 al año considerando 5.600 toneladas anuales.

En la Tabla 4.25 se puede observar el resumen de los ingresos hacia la planta de reciclaje.

Tabla 4.25: Resumen de ingresos.

Ítem	US \$ /Año
Productos Pirólisis	\$ 1.123.732
Tasa Ecológica	\$ 1.740.601
TOTAL	\$ 2.864.333

4.2.4.6. OPCIÓN DE FINANCIAMIENTO

Para la puesta en marcha del proceso se consideran dos escenarios posibles, el primero correspondiente a una inversión sin financiamiento externo y la segunda con financiamiento externo. La opción con financiamiento externo considera un préstamo del 30 % de total de la inversión, obteniendo una suma de US \$ 600.000, considerado a un interés del 10 % anual a 10 años, obteniendo una cuota mensual de US \$ 97.647.

La amortización de la deuda y su interés puede ser observado en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26: Tabla de amortización del préstamo.

Año	Deuda [US \$]	Interés [US \$]	Cuota [US \$]	Amortización [US \$]
1	\$ 600.000	\$ 60.000	\$ 97.647	\$ 37.647
2	\$ 562.353	\$ 56.235	\$ 97.647	\$ 41.412
3	\$ 520.941	\$ 52.094	\$ 97.647	\$ 45.553
4	\$ 475.388	\$ 47.539	\$ 97.647	\$ 50.108
5	\$ 425.279	\$ 42.528	\$ 97.647	\$ 55.119
6	\$ 370.160	\$ 37.016	\$ 97.647	\$ 60.631
7	\$ 309.529	\$ 30.953	\$ 97.647	\$ 66.694
8	\$ 242.834	\$ 24.283	\$ 97.647	\$ 73.364
9	\$ 169.470	\$ 16.947	\$ 97.647	\$ 80.700
10	\$ 88.770	\$ 8.877	\$ 97.647	\$ 88.770

4.2.4.7. FLUJOS DE CAJA

El flujo de caja para el proyecto es presentado para dos escenarios en un periodo de 10 años, el primero es el escenario sin financiamiento externo, mientras el segundo escenario corresponde al flujo de caja con un financiamiento externo. Para ambos escenarios se considera una curva de aprendizaje de 60 % para el primer año, 90 % para el segundo año y 100 % para el tercer año. Ambos flujos de caja están evaluados en dólares estadounidenses.

a. SIN FINANCIAMIENTO

El flujo de caja sin financiamiento no considera una amortización debido a que no existe una deuda, puesto a que no existe un financiamiento externo. Esto puede ser visto a detalle en la Tabla 4.27.

Tabla 4.27: Flujo de caja sin financiamiento.

Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333
Egresos		\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057
Interés financiamiento		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciacion		\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929
Utilidad antes de Impuesto		\$ 1.441.347	\$ 1.441.347	\$ 1.441.347	\$ 1.441.347	\$ 1.441.347
Impuesto		\$ 389.164	\$ 389.164	\$ 389.164	\$ 389.164	\$ 389.164
Utilidad después de Impuesto		\$ 1.052.183	\$ 1.052.183	\$ 1.052.183	\$ 1.052.183	\$ 1.052.183
Amortización		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación		\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929
Inversiones	\$ -2.144.331					\$ -247.439
Capital de trabajo	\$ -250.000					
Flujo de caja	\$ -2.394.331	\$ 732.667	\$ 1.099.000	\$ 1.221.112	\$ 1.221.112	\$ 973.673
Curva de aprendizaje		60 %	90 %	100 %		

Año	6	7	8	9	10
Ingresos	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333
Egresos	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057
Interés financiamiento	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciacion	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929
Utilidad antes de Impuesto	\$ 1.441.347	\$ 1.441.347	\$ 1.441.347	\$ 1.441.347	\$ 1.441.347
Impuesto	\$ 389.164	\$ 389.164	\$ 389.164	\$ 389.164	\$ 389.164
Utilidad después de Impuesto	\$ 1.052.183	\$ 1.052.183	\$ 1.052.183	\$ 1.052.183	\$ 1.052.183
Amortización	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929
Inversiones					
Capital de trabajo					\$ 250.000
Flujo de caja	\$ 1.221.112	\$ 1.221.112	\$ 1.221.112	\$ 1.221.112	\$ 1.471.112
Curva de aprendizaje					

b. CON FINANCIAMIENTO

El flujo de caja con financiamiento genera una amortización e interés de la deuda, el cual puede ser visto a detalle en la Tabla 4.28.

Tabla 4.28: Flujo de caja con financiamiento.

Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333
Egresos		\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057
Interés financiamiento		\$ -60.000	\$ -56.235	\$ -52.094	\$ -47.539	\$ -42.528
Depreciacion		\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929
Utilidad antes de Impuesto		\$ 1.381.347	\$ 1.385.111	\$ 1.389.252	\$ 1.393.808	\$ 1.398.819
Impuesto		\$ 372.964	\$ 373.980	\$ 375.098	\$ 376.328	\$ 377.681
Utilidad después de Impuesto		\$ 1.008.383	\$ 1.011.131	\$ 1.014.154	\$ 1.017.480	\$ 1.021.138
Amortización	\$ 600.000	\$ -37.647	\$ -41.412	\$ -45.553	\$ -50.108	\$ -55.119
Depreciación		\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929
Inversiones	\$ -1.544.331					\$ -247.439
Capital de trabajo	\$ -250.000					
Flujo de caja	\$ -1.194.331	\$ 683.799	\$ 1.024.783	\$ 1.137.530	\$ 1.136.300	\$ 887.508
Curva de aprendizaje		60 %	90 %	100 %		

Año	6	7	8	9	10
Ingresos	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333	\$ 2.864.333
Egresos	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057	\$ -1.254.057
Interés financiamiento	\$ -37.016	\$ -30.953	\$ -24.283	\$ -16.947	\$ -8.877
Depreciacion	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929	\$ -168.929
Utilidad antes de Impuesto	\$ 1.404.331	\$ 1.410.394	\$ 1.417.063	\$ 1.424.400	\$ 1.432.470
Impuesto	\$ 379.169	\$ 380.806	\$ 382.607	\$ 384.588	\$ 386.767
Utilidad después de Impuesto	\$ 1.025.161	\$ 1.029.587	\$ 1.034.456	\$ 1.039.812	\$ 1.045.703
Amortización	\$ -60.631	\$ -66.694	\$ -73.364	\$ -80.700	\$ -88.770
Depreciación	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929	\$ 168.929
Inversiones					
Capital de trabajo					\$ 250.000
Flujo de caja	\$ 1.133.459	\$ 1.131.822	\$ 1.130.021	\$ 1.128.040	\$ 1.375.861
Curva de aprendizaje					

4.2.4.8. INDICADORES ECONÓMICOS

Luego de obtener ambos flujos de caja, es posible determinar el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para cada escenario, los cuales pueden ser vistos a detalle en la Tabla 4.29.

Tabla 4.29: Resumen de los indicadores económicos.

Indicador	Valor
Sin financiamiento	
VAN	\$ 4.506.658
TIR	42 %
Con financiamiento	
VAN	\$ 5.212.683
TIR	75 %

4.2.5. ANÁLISIS DE RIESGOS

El análisis de riesgo consiste en la simulación de la variación de los ingresos que recibe la planta en base a funciones de densidad de probabilidad basadas en los posibles escenarios en que pueden variar los precios mencionados. Para esta prueba de análisis de riesgos, se utiliza el *software RISK* de *Paladise*, el cual permite generar una simulación de indicadores económicos como el VAN y el TIR para los precios que pueden tomar la venta del aceite pirolítico, el acero, el carbón *black* y la tasa de eliminación de residuos.

Para este ensayo de simulación se establecen 10.000 iteraciones para los valores de venta de los productos, los cuales en base a las funciones de probabilidad generan distintos valores para el VAN y el TIR.

4.2.5.1. ENTRADAS

Para esta simulación, se establecen cuatro valores de entradas con sus respectivas funciones de probabilidad. Para el caso del aceite pirolítico se establece una distribución triangular sesgada hacia la izquierda, lo cual significa que dicho valor concentra su mayor densidad en los precios altos, considerando que el valor de venta del aceite pirolítico tiene una tendencia alcista debido a la demanda para la generación de combustible a futuro en base a productos reciclados. Con respecto a la venta del carbón *black*, se establece una distribución uniforme, considerando que el valor de venta del mismo tiene una probabilidad de ascender o descender similar. La venta del acero sigue una distribución triangular sesgada hacia la izquierda, concentrando sus valores en los precios altos debido al aumento de la demanda de acero. Con respecto a la distribución de los precios de la tasa ecológica o tasa de eliminación se establece una distribución T-Normal, con una media de US \$ 312 y una desviación de US \$ 50, distribución que modela el precio en base a una probabilidad similar de ascender o descender debido al aumento de la oferta de plantas de reciclaje que puede impulsar la ley REP y el aumento de inventarios de NFU que se puede presentar en los próximos años, adicionalmente, se establece una condición donde el precio de eliminación sea negativo, significando que en un escenario muy poco probable, la tasa de eliminación de residuos sea asumida por la planta de reciclaje bajo cambios en las condiciones políticas del país.

En la Tabla 4.30 es posible observar un resumen de las entradas para generar la simulación de los indicadores

económicos.

Tabla 4.30: Resumen de INPUTS para el análisis de riesgos.

Entrada	Función de Pprobabilidad	Mínimo [CLP \$ /kg]	Máximo [CLP \$ /kg]	Media [CLP \$ /kg]	Desv. est. [CLP \$ /kg]	5 % [CLP \$ /kg]	95 % [CLP \$ /kg]
Aceite Pirofítico	Triangular	\$ 151,46	\$ 348,92	\$ 260,67	\$ 41,52	\$ 186	\$ 323,91
Carbón <i>Black</i>	Uniforme	\$ 50	\$ 80	\$ 65	\$ 8,66	\$ 51,49	\$ 78,49
Acero	Triangular	\$ 80,19	\$ 109,85	\$ 96,66	\$ 6,23	\$ 85,47	\$ 106,12
Tasa Ecológica	T-Normal	-\$ 36,77	\$ 547,93	\$ 250	\$ 75	\$ 126,58	\$ 373,36

En las Figuras B.2, B.3, B.4 y B.5 es posible observar las graficas de las funciones de probabilidad utilizadas para los precios establecidos.

4.2.5.2. SALIDAS

Luego de obtener las gráficas de entradas, se establece una simulación de 10.000 iteraciones para evaluar como dichas variaciones afectan en los indicadores económicos, obteniendo los escenarios posibles de cómo podrían afectar al proyecto la variación de los ingresos que recibe la planta de reciclaje.

En la Tabla 4.31 es posible observar el resumen de las salidas de la simulación, luego de las 10.000 iteraciones.

Tabla 4.31: Resumen de OUTPUTS para el análisis de riesgos.

Salida	Mínimo [US \$]	Máximo [US \$]	Media [US \$]	Desv. est. [US \$]	5 % [US \$]	95 % [US \$]
VAN / S. Financiamiento	\$-4.510.467	\$13.398.065	\$ 4.214.140,53	\$ 2.242.807,92	\$ 508.598,19	\$ 7.885.765,74
TIR / S. Financiamiento	-27 %	91 %	39,23 %	14,37 %	14,42 %	61,31 %
VAN / C. Financiamiento	\$-3.804.442	\$14.104.090	\$ 4.920.166,04	\$ 2.242.807,92	\$ 1.214.623,69	\$ 8.591.791,24
TIR / C. Financiamiento	-23 %	164 %	71,36 %	24,82 %	28,9 %	110,33 %

En las Figuras B.6, B.7, B.8 y B.9 es posible observar las graficas obtenidas para los indicadores económicos luego de generar la simulación.

4.2.5.3. ESTADÍGRAFOS

Los estadísticos de resumen o estadígrafos corresponden a números que permiten establecer una conclusión acerca de un estudio determinado. Para este caso, se establecen siete estadígrafos, los cuales son los siguientes:

- **Costo de la incertidumbre:** Este valor corresponde a la suma máxima que un inversionista debe pagar por información perfecta relacionada con la oportunidad de la inversión.
- **Probabilidad de fracaso:** Correspondiente a la probabilidad en que la inversión no genere retornos.
- **Probabilidad de éxito:** Correspondiente a la probabilidad en que la inversión si genere retornos.
- **Valor esperado del VAN:** Valor mas probable que puede tomar el Valor Actual Neto con las condiciones de entrada dadas.
- **Valor en riesgo del proyecto:** Valor que permite obtener la perdida máxima de una inversión en un horizonte temporal con una confianza del 95 %.
- **Costo de la irracionalidad:** Valor de tomar un curso de acciones erradas que conlleve a un fracaso del proyecto.
- **Intervalo de confianza para el VAN:** Intervalo en cual se puede establecer con un 95 % de confianza que puede fluctuar el Valor Actual Neto.

En esta etapa del proyecto se establecen los estadígrafos correspondientes a la opción mas riesgosa a tomar, la cual corresponde a una inversión sin financiamiento externo, generando un menor Valor Actual Neto del proyecto debido a que el inversionista deberá asumir el 100 % del costo de la inversión inicial.

Para el primer estadígrafo, el costo de la incertidumbre es calculada como el promedio de los valores actuales netos negativos obtenidos en la simulación, debido a que es considerado como el costo a pagar en caso de obtener una información perfecta para evitar este curso de acción que conlleve a un fracaso.

La probabilidad de fracaso es calculada con el porcentaje de probabilidad en el cual el Valor Actual Neto es negativo, significando una perdida para el inversionista. En consecuencia, es posible determinar la probabilidad de éxito como el 100 % menos la probabilidad de fracasar.

El valor esperado para el Valor Actual Neto es determinado con la media del gráfico obtenido para el VAN en la simulación luego de las 10.000 iteraciones generadas con los respectivos valores de entrada de los ingresos que puede recibir la planta.

El valor en riesgo del proyecto se establece como la probabilidad del 5 % del gráfico obtenido en la simulación, considerando que es valor al cual correspondería pagar el inversionista en un caso de fracaso, con un 95 % de

confianza.

El costo de la irracionalidad es calculado como la media multiplicado por -1, considerando que en un caso hipotético en el cual se lleguen a tomar TODAS las decisiones erróneas de proyecto, sería el costo a pagar por el inversionista.

El intervalo de confianza para el Valor Actual Neto fluctúa entre dos límites, los cuales representan el intervalo mas probable en el cual puede fluctuar el VAN con un 95 % de confianza. Dicho intervalo es determinado con la Ecuación 4.2.

$$\text{Intervalo de confianza} = \mu \pm 1,96 * S$$

Donde :

μ : Media para el VAN.

S : Desviación estándar del VAN.

(4.2)

Luego de definida la metodología establecida para el cálculo de los estadígrafos, observando la Tabla 4.32 es posible observar los valores necesarios para su determinación.

Tabla 4.32: Resumen detallado para el VAN sin financiamiento.

Estadístico		Percentiles	
Mínimo	-\$ 4.510.467,09	1 %	-\$ 970.209,18
Máximo	\$ 13.398.064,87	3 %	-\$ 246.507,00
Media	\$ 4.214.140,53	5 %	\$ 508.598,19
Moda	\$ 3.923.515,67	10 %	\$ 1.326.818,80
Desv. estándar	\$ 2.242.807,92	20 %	\$ 2.342.426,82
Varianza	5,030E+012	25 %	\$ 2.705.454,09
Asimetría	-0,0110	50 %	\$ 4.232.275,80
Curtosis	2,9859	75 %	\$ 5.708.668,48
Errores	0	80 %	\$ 6.090.893,38
		90 %	\$ 7.112.135,54
		95 %	\$ 7.885.765,74
		98 %	\$ 8.589.310,31
		99 %	\$ 9.500.113,78

Finalmente, es posible determinar los estadígrafos mencionados que pueden ser vistos en la Tabla 4.33.

Tabla 4.33: Resumen de estadígrafos del análisis de riesgo.

Costo de la incertidumbre	-\$608.358,09
Probabilidad de fracaso	3 %
Probabilidad de éxito	97 %
Valor esperado del VAN	\$ 4.214.140,53
Valor en riesgo del proyecto	\$ 508.598,19
Costo de la irracionalidad	-\$ 4.214.140,53
Intervalo de confianza para el VAN	
Límite Inferior	\$4.170.181,50
Límite Superior	\$4.258.100

5 | ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. FASE EXPERIMENTAL

5.1.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO

Luego de la realización del análisis exploratorio para la degradación del neumático previo a la utilización de un sistema de tensión, es posible determinar que, si bien existe una degradación presente, esta es muy baja en un periodo corto de tiempo, por lo cual es posible concluir que es necesario de una ayuda externa para poder inducir un fracturamiento que permita disminuir el tamaño del neumático. La utilización de una fuerza aplicada para generar grietas en las cuales el gas pueda penetrar el caucho facilita el proceso de degradación pudiendo llegar a una degradación del 100 % en un periodo corto de tiempo.

Durante el análisis exploratorio es posible observar que existe un fracturamiento progresivo en el tiempo cuando la muestra es sometida a ambos factores, lo cual se explica debido a la oxidación que presenta la muestra por la presencia de ozono, debilitando sus enlaces y siendo progresivamente fragmentados por la presencia de una fuerza en tensión, fuerza que ayuda significativamente a la propagación de grietas a medida que se van debilitando los enlaces por un proceso de óxido-reducción.

Si bien se realizaron pruebas con diversos aditivos, estas no son concluyentes para determinar que los aditivos utilizados puedan favorecer o entorpecer el proceso, debido a que no se incluyeron aditivos en el sistema de tensión.

5.1.2. CLUSTERING DE MUESTRAS

Luego de la generación del agrupamiento de muestras se generan tres conglomerados, los cuales dependen del alto y del ancho de la muestra, lo anterior es debido a que el sistema de tensión generado tiene limitaciones técnicas para su operación, pudiendo estirar hasta cierto punto dependiendo del alto que presente la muestra de neumático. Los conglomerados generados son validados de forma visual, generando centroides con un promedio de 0,3 centímetros de desviación, lo cual genera un agrupamiento efectivo a la hora de situar la muestra en el sistema de tensión. La razón

principal de la viabilidad de un sistema de agrupamiento es generar una metodología que sea independiente de las condiciones de la muestra para evaluar su condición de fracturamiento expuesta a ozono y una fuerza en tensión.

Los conglomerados utilizados corresponden al grupo dos y tres, debido a que las muestras correspondientes al grupo uno presentan un tamaño en el alto que dificulta su fijación en el sistema de tensión, pudiendo generar estimaciones erróneas para la posterior utilización en el diseño factorial, asimismo, la distancia entre los centroides del grupo dos y tres presentan una distancia de 0,8 cm, lo cual resulta significativamente menor con respecto a la distancia con el grupo uno que presenta una distancia en promedio de 1,7 cm con respecto al conglomerado dos y tres.

Las muestras seleccionadas para la utilización en el diseño factorial no contienen diferencias significativas con respecto a sus propiedades, logrando generar una independencia al sistema a la hora de su evaluación, logrando disminuir el error y logrando establecer una condición óptima para la evaluación de la concentración de ozono y la fuerza en tensión necesaria para generar el fracturamiento.

5.1.3. DISEÑO FACTORIAL

5.1.3.1. COEFICIENTES DEL MODELO Y VARIANZA

El diseño factorial propuesto para dos factores en un sistema factorial completo de dos y cuatro niveles respectivamente para la concentración de ozono y la fuerza en tensión, es analizable en varias etapas, iniciando por la regresión propuesta por el diseño para evaluar la correlación existente en el fracturamiento cuando se genera una interacción entre ambos factores. El modelo de regresión generado consta de tres etapas, donde primero se genera una regresión individual para ambos factores por separado, para luego generar una regresión en la interacción de ambos factores, lo cual nos entrega un resultado que permite establecer las relaciones establecidas entre ambas influencias. Para aceptar la regresión existen diversos términos de la regresión que pueden ser visualizados en la Tabla 4.9, donde en primera instancia podemos observar el valor del coeficiente, en el cual los valores positivos actúan sinérgicamente con la respuesta, mientras los valores negativos actúan de forma contraria. Lo anterior quiere decir que, si calculamos el valor de la respuesta individualmente con la concentración de ozono y la tensión por separado, obtendremos un resultado el cual su media es menor a la media combinada de ambos factores para obtener el resultado de la respuesta, la cual corresponde al fracturamiento.

Con respecto a los errores de la regresión expuestos en la Tabla 4.9 es posible observar que el error estándar para medir la precisión de la estimación al momento de tomar muestras de la misma población de datos es bajo, lo cual permite concluir que la estimación es bastante precisa a la hora de estimar la respuesta. El valor T de la Tabla 4.9 mide básicamente la relación entre el coeficiente y el error estándar, por lo cual nos permite posteriormente establecer el valor p que nos permite aceptar o rechazar la hipótesis nula de la regresión. La importancia del valor p expuesto en la Tabla 4.9 es para determinar la probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula, la cual establece que existe una variación nula en la respuesta con respecto a las entradas establecidas, al obtener números menores

a 0,05 en el valor p es posible establecer con un riesgo del 5 % o menos que el modelo establecido en la regresión explica correctamente la variación en la respuesta de acuerdo a las entradas establecidas, es decir, el comportamiento del fracturamiento con respecto a la concentración de ozono y la fuerza en tensión es correcto. El valor FIV permite establecer las correlaciones existentes entre los predictores del modelo, para establecer una correlación entre las entradas definidas obtener la respuesta. Con respecto a la regresión generada en este modelo, es posible determinar que las regresiones con dos o más factores están moderadamente correlacionadas, lo cual implica que efectivamente existe una interacción entre ambos factores al momento de generar el fracturamiento. Cuando existe un valor FIV mayor a 5, se sugiere que la regresión se estimó de forma deficiente, lo cual no es caso de esta regresión, por lo cual es posible validar el modelo establecido en el diseño factorial.

Finalmente, el coeficiente de determinación establecido en la Tabla 4.10, establecido como R-cuadrado, nos permite evidenciar que la desviación del modelo generado para predecir la respuesta, con respecto a los valores reales es baja, obteniendo una relación entre la varianza real y estimada cercana en un 98 %, validando el modelo generado.

Con respecto al análisis de la varianza del modelo generado, expuesto en la Tabla 4.11 es posible observar diversos estadísticos que permiten establecer conclusiones con respecto a la varianza del modelo generado, los grados de libertad dependen netamente del número de observaciones establecidas en la regresión, con respecto a la suma de los cuadrados del modelo, se establece un análisis de yates que devuelve un ANOVA del modelo de la varianza de la regresión. Los estadísticos mencionados anteriormente, además de los cuadrados medios ajustados y el valor F son utilizados para posteriormente calcular el Valor p , valor que nos entrega la significancia con respecto a la hipótesis nula, la cual establece que los modelos establecidos no predicen que forma correcta el fracturamiento. Al obtener valores p menores a 0,05, es posible establecer con un riesgo del 5 % que esta hipótesis nula es rechazada, logrando establecer que la varianza que experimenta el modelo es significativamente aceptada para concluir que la predicción en base a las entradas establecidas modela de forma correcta la respuesta.

5.1.3.2. GRÁFICAS

Las gráficas obtenidas del diseño factorial permiten establecer tendencias y coherencias respecto a la modelación realizada. Dentro de estas gráficas, el diagrama de Pareto establecido en la Figura 4.2 permite identificar los efectos principales que son estadísticamente significativos a la hora de obtener la respuesta, la cual en este caso corresponde al fracturamiento. Dentro de esta gráfica podemos observar el valor del efecto estandarizado que corresponde a la confianza del 95 % de la estimación, valor que está definido en 2,12. En la gráfica es posible observar que la influencia de la concentración de ozono en el fracturamiento es significativa, y la de mayor influencia en la respuesta, seguido por la tensión. Esto permite concluir que la concentración de ozono es el factor más importante para inducir un fracturamiento en un neumático, sin embargo, la condición de una fuerza en tensión aporta de menor forma, pero significativamente.

El gráfico presente en la Figura 4.3 permite establecer la simetría de los datos con respecto a los residuos, siendo

los residuos la resta entre el valor predicho por la regresión y el valor real del fracturamiento. En esta gráfica podemos observar que existe una relación simétrica con una leve inclinación hacia una sobre estimación del fracturamiento, sin embargo, debido a la magnitud de estos residuos, que promedia en 0,04, podemos establecer que el modelamiento realizado en el diseño factorial es correcta.

La gráfica de probabilidad normal, establecida en la Figura 4.4 permite identificar los residuos versus los valores esperados, lo cual permite identificar si es que los residuos están distribuidos de forma correcta. Al tener una línea recta en esta gráfica podemos concluir que los residuos están distribuidos de forma correcta de acuerdo con el diseño factorial generado.

La gráfica de residuos vs ajustes, presente en la Figura 4.5 permite establecer la aleatoriedad en su distribución, además de mantener una varianza constante. Para esta gráfica es correcto señalar que se encuentra una disposición aleatoria con respecto al 0 distribuidos de forma uniforme sin patrones detectables. En la gráfica expuesta podemos analizar que existe una distribución aleatoria hacia ambos lados del 0 lo que permite concluir que existe una distribución constante de la varianza para los ajustes realizados en los residuos.

La gráfica de residuos vs orden, establecida en la Figura 4.6 permite verificar la influencia de los residuos a medida que avanza el orden de la observación tomada, siendo la observación cada prueba individual establecida para lograr el diseño factorial. En esta gráfica podemos observar una tendencia en los residuos a medida que avanza el orden de observación, lo cual implica que las muestras cercanas están correlacionadas, lo cual se explica debido a que las muestras fueron seleccionadas mediante un método de agrupamiento lo que implica una no aleatoriedad a medida que avanzan las observaciones.

La gráfica presente para los efectos principales generados en la respuesta para ambos factores presentes en la Figura 4.7 permite establecer la relación individual entre cada uno de los efectos sobre la respuesta. Al obtener una línea no horizontal para la respuesta es posible determinar que existe una influencia en el fracturamiento por la acción de la concentración de ozono y la fuerza en tensión propuesta en la metodología de trabajo para la experimentación. Para ambos casos, es posible observar que la media del fracturamiento es directamente proporcional a la concentración de ozono y la fuerza en tensión, lo que permite establecer que, a mayor concentración, y a mayor tensión el fracturamiento del neumático tiende a subir. Si analizamos la gráfica presente en la Figura 4.8, podemos establecer la interacción presente entre ambos factores, al obtener líneas paralelas en este gráfico es posible establecer que no existe una interacción aparente entre ambos predictores, concluyendo que el fracturamiento depende por separado de la influencia de cada factor, y no así de la interacción entre ambos términos. En esta gráfica es posible determinar que la influencia de concentraciones y tensiones altas es significativamente mayor a la hora de generar una respuesta en la muestra, lo cual implica que efectivamente a mayor concentración, y a mayor tensión se logra generar un fracturamiento mayor en la muestra de neumático.

5.2. FASE ECONÓMICA

El análisis correspondiente a la fase económica del proyecto de reciclaje de neumáticos fuera de uso mediante la utilización de ozono y pirólisis establece algunos supuestos: 1) el tiempo de degradación del reactor de ozono a nivel industrial cumple con la condición establecida de 20 toneladas día, 2) la utilización del ozono a nivel industrial es técnicamente factible. Para estos escenarios se establece una inversión para estudios que permiten concluir los supuestos establecidos.

La estructura de la planta basada en pirólisis para generar productos comercializables es validada de acuerdo con las referencias establecidas, logrando generar los productos que se establecen en los resultados, los cuales al ser comercializados suponen una rentabilidad mayor a los gastos operacionales.

Con respecto a la localización, la comuna de Sierra Gorda supone ser un lugar clave para el establecimiento de un centro de reciclaje de neumáticos debido a la cercanía con grandes faenas mineras que contienen inventarios de NFU que deberán ser eliminados de acuerdo con la ley REP y la ley de cierre de faenas, logrando sostener la planta en un periodo de 10 años sin problemas aparentes, considerando la competencia establecida en la zona de otras plantas de reciclaje.

5.2.1. VIABILIDAD ECONÓMICA

Las inversiones necesarias para establecer el proyecto de reciclaje son competitivas frente a los métodos actuales, estableciendo una inversión total cercana a los 2 millones de dólares, logrando generar una rentabilidad considerable.

Los gastos operacionales de la planta fluctúan correctamente entre los gastos utilizados actualmente en plantas en operación, lo cual sirve para validar los mismos. La diferencia principal con respecto a la competencia radica en la utilización de ozono para la degradación de los neumáticos fuera de uso, generando un proceso amigable con el medio ambiente y reduciendo las emisiones de carbono generadas por las metodologías actuales para este proceso, generalmente basadas en el corte por cizalle.

El margen operacional entre los ingresos y los gastos de operación permiten establecer que la planta de reciclaje es económicamente rentable en un periodo de 10 años, generando un margen aproximado de 1,6 millones de dólares para los periodos posteriores a la inversión. Los ingresos principales corresponden a los productos obtenidos por el proceso de pirólisis, sin embargo, la tasa ecológica por la eliminación del pasivo ambiental es estrictamente necesaria para mantener la viabilidad económica del proyecto, en caso de que esta no exista, el proyecto tendera a fracasar.

La opción de financiamiento establecida en un 30 % del total de la inversión minimiza el impacto hacia el inversionista, generando un préstamo de 10 % de interés anual amortizando la deuda en un periodo de 10 años, lo cual se vuelve en una opción viable para mantener la viabilidad del proyecto disminuyendo la carga de inversión inicial.

Los indicadores económicos logran establecer que el proyecto es económicamente rentable, logrando un valor actual neto para un proyecto sin financiamiento externo de 4,5 millones de dólares con una tasa interna de retorno del 42 %. Dichos indicadores aumentan cuando se acepta la opción con financiamiento, llegando a un valor actual neto de 5,2 millones de dólares y una tasa interna de retorno del 75 %, sin embargo, esta opción disminuye la cantidad de flujo de dinero anual que recibe el proyecto. Debido a lo anterior, es posible establecer que la viabilidad económica del proyecto con y sin financiamiento es económicamente rentable en el periodo establecido de 10 años.

5.2.2. ANÁLISIS DE RIESGOS

El análisis de riesgos mediante una simulación en los precios de venta de los productos de la pirólisis, además de la tasa ecológica establecida logran entregar una visión de posibles inconvenientes que pueda presentar el proyecto ante escenarios diversos.

El precio del aceite pirolítico oscila entre los 151 y 348 pesos chilenos por kilo, marcando una tendencia alcista debido a la utilización de aceite para la generación de combustible que se puede presentar en los últimos años, sin embargo, existe una posibilidad que este precio vaya a la baja si es que existe un excesivo aumento de la oferta de plantas que establezcan este producto.

Con respecto al precio del *carbón black*, oscila entre los 50 y 80 pesos chilenos el kilo, estableciendo que el precio puede oscilar sin una tendencia establecida debido a que depende netamente de la oferta y la demanda, sin embargo, esta tendencia puede cambiar si se logran establecer estudios que posibiliten una mejora en este producto en alternativas como la generación de carbón activado o venta de grafito para la utilización de baterías de litio.

El precio del acero muestra una tendencia alcista con un precio variable entre los 80 y los 110 pesos chilenos el kilo, estableciendo que en los últimos tiempos ha existido un aumento en la demanda de este producto generando una evolución positiva en su precio, sin embargo, existe una posibilidad en que la oferta aumente y el precio pueda tender a la baja.

La tasa ecológica oscila entre los -33 y 547 pesos chilenos el kilo de neumático, tasa que es cobrada al cliente por eliminar el pasivo ambiental generado por neumáticos fuera de uso. La probabilidad de que este valor vaya al alza es alta, debido a la generación de leyes como la ley REP, que obligan al importador a hacerse cargo de estos residuos, obligando a las empresas mineras a manejar de forma responsable los neumáticos fuera de uso, sin embargo, existe una posibilidad en que este precio sea negativo, interpretándose como que la planta de reciclaje deba pagar por obtener neumáticos para su reciclaje, esta posibilidad poco probable puede suceder en escenarios políticos complejos donde exista una eliminación de leyes como la ley REP y las empresas mineras no estén obligadas a manejar estos residuos, limitando la posibilidad de obtener el pasivo ambiental para su posterior reciclaje.

Luego de establecer la tendencia que pueden tener los precios de venta de los productos de la pirólisis y la tasa ecológica, se obtienen los indicadores económicos para los escenarios con y sin financiamiento externo, obteniendo un panorama bastante optimista con una tendencia a un proyecto rentable con una probabilidad cercana al 95 % para ambos

casos, sin embargo, existe la remota posibilidad que el proyecto no funcione si es que todos los precios tienden a ir a la baja o se tomen decisiones erróneas.

Los estadígrafos calculados en este proyecto son para el peor escenario posible, el cual corresponde a no conseguir un financiamiento externo y el peso caiga netamente en el inversionista, para este escenario podemos obtener un porcentaje de éxito del 97 % y una probabilidad de fracasar del 3 % con un valor esperado para el valor actual neto con una tasa de descuento del 10 % cercan a los 4 millones de dólares en 10 años. El costo de la incertidumbre se plantea en cerca de 600 mil dólares, valor que se traduce en la cifra a pagar por obtener información perfecta para que el proyecto no fracase, información que es virtualmente imposible de conseguir puesto que se debería tener una visión a futuro de los cambios que puedan presentar los precios de venta y la variación que pueda experimentar la tasa ecológica.

Para esta etapa todo indica que el proyecto es económicamente rentable para el periodo establecido siempre y cuando se logren verificar que los supuestos se cumplen, principalmente la degradación por ozono a escala industrial.

6 | CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este proyecto dan a concluir que la solución propuesta para la problemática de la acumulación de neumáticos fuera de uso en minería es técnicamente factible a nivel de laboratorio, y económicamente rentable bajo los supuestos establecidos, logrando un fracturamiento del 100 % en un periodo de 3 horas a una concentración de 11,5 ppm de Ozono y una fuerza en tensión de 20 kN.

La utilización de ozono para la degradación de neumáticos permite establecer una solución amigable con el medio ambiente en comparación a las alternativas actuales que principalmente se basan en la utilización de cortes mediante cizalle, los cuales generan partículas en suspensión y emisiones de carbono debido a que son tecnologías basadas en combustibles fósiles.

Con respecto a la viabilidad económica, es posible establecer su rentabilidad basado en indicadores económicos como el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno, los cuales para un escenario desfavorable, y sin financiamiento externo logra generar un VAN de 4,5 millones de dolares y un TIR de 42 % en un periodo de 10 años para una planta de 20 toneladas/día, logrando atenuar de forma sustancial los inventarios de NFU presentes en la actualidad, además de lograr satisfacer las metas de valorización establecidas por la ley REP.

La degradación mediante ozono logra debilitar los enlaces del neumático debido a su potencial oxidante. Si bien es cierto que se genera una debilitación parcial, esta debe ser acompañada por una fuerza en tensión que logre romper los enlaces y generar el agrietamiento esperado.

La importancia de la utilización de un diseño factorial en este proyecto da a concluir que es útil para establecer una validación de la metodología de experimentación, generando regresiones lineales que modelan el fracturamiento en base a las entradas mencionadas logrando obtener un escenario realista y esperado de la respuesta, el cual es validado con el nivel de significancia el cual logra rechazar la hipótesis nula en la cual se establece que existe una nulidad de variación en la respuesta debido a la aplicación de entradas. Sin la utilización de un diseño factorial es imposible concluir que los resultados obtenidos en la fase experimental son efectivos, debido a que no sería posible obtener una cuantificación del error estimativo que puede generarse por la intervención humana, considerando que se plantea una situación que netamente depende del experimentador.

Adicionalmente, la viabilidad económica es una muestra parcial sobre una situación actual del panorama

propuesto para la planta de reciclaje, sin embargo, gracias a la utilización de un análisis de riesgos basado en la simulación de eventos probables para la variación de los ingresos, es posible establecer una mirada a largo plazo sobre los eventos que pueden afectar directa e indirectamente la inversión, estableciendo un porcentaje de éxito del proyecto del 97 %, lo cual se traduce en un proyecto rentable con bajo riesgo para el inversionista.

Si bien es cierto que el ozono se presenta como una alternativa para el reciclaje de NFU, esto no podría ser económicamente factible sin la utilización de un proceso adicional que genere valor al proceso, dicho esto, es estrictamente necesario la utilización de la pirólisis, siendo el proceso que finalmente genera rentabilidad al proyecto.

6.0.1. RECOMENDACIONES

Inicialmente se recomienda realizar estudios sobre la factibilidad industrial del ozono para la utilización en la degradación de NFU a mayor escala, siendo finalmente el paso siguiente para establecer el cambio de fase desde pre-factibilidad a factibilidad. Adicionalmente, es recomendable generar estudios de como el Ozono puede impactar positiva o negativamente en el proceso de pirólisis, considerando que el ozono genera una reacción química que puede alterar el proceso final para la obtención de los productos necesarios para la rentabilidad.

El ozono para este estudio se aplico en forma gaseosa y con un sistema de tensión, es recomendable estudiar la viabilidad en la utilización de procesos que incluyan el ozono en otros estados de la materia como forma liquida, siendo posible la utilización en un medio acuoso con aditivos, sin embargo, se debe considerar los impactos que pueda generar la utilización de agua en la localidad establecida, además de los tiempos de secado y como esto puede afectar al proyecto. Además, se recomienda establecer un estudio de factibilidad de otros caminos para la degradación de neumáticos mediante ozono y acompañar con otros mecanismos como la aplicación de calor y variación de presión.

Otra solución viable para la degradación de neumáticos y su problemática en la acumulación actual, es la generación de un prototipo a nivel industrial que pueda disminuir el tamaño *in situ*, con un reactor móvil y modular que pueda ser situado directamente en faenas para disminuir los costos en traslado que actualmente son elevados.

Finalmente, es necesario el estudio de los análisis de riesgos del escenario en el cual se toma un financiamiento externo, estableciendo el impacto que puede generar la variación de interés en el préstamo, y como este puede afectar la rentabilidad económica del proyecto. Agregando a lo anterior, es recomendable generar un estudio de la variación del precio del oxígeno, considerando que es una materia prima para la generación de ozono, y que en un escenario como el vivido actualmente en pandemia, tiende a una generar un valor en crecimiento de este producto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Camara Minera de Chile. Webinar reciclaje de neumaticos mineros en chile, 2021. 1.1
- [2] Alan Neville Gent and Joseph D Walter. Pneumatic tire, 2006. 2.1.1
- [3] Biblioteca Nacional del Congreso. Ley chile 20920, 2016. 2.2.1.1
- [4] Revista REDIMIN. Industria minera se prepara para cumplir normativa de neumáticos de la ley rep, 2021. 2.2.1.1
- [5] Mikko Siren. Tire recycling concept: Reducing tire and tire plant carbon emissions by recycling, 2021. 2.2.3, 2.2.4.1, 2.2.4.2, a, 2.2.4.3
- [6] Valerie L Schulman. Tyre recycling, 2011. 2.2.4.1
- [7] Juan Daniel Martínez, Neus Puy, Ramón Murillo, Tomás García, María Victoria Navarro, and Ana Maria Mastral. Waste tyre pyrolysis – a review, 2013. 2.2.4.2, b
- [8] Eric Keightley Rideal. Ozone, 1920. 2.3.1
- [9] AG Fuerza. Tablas de propiedades del ozono, 1961. 2.3.2
- [10] Deniss Klauson. Physical and chemical properties of ozone, 1983. 2.3.2.1, 2.3.2.1, b, b, a, b, c
- [11] Sagar V Krupa and William J Manning. Atmospheric ozone: formation and effects on vegetation, 1988. 2.3.3.1, 2.3.3.2
- [12] Marco A Clemente Salazar and José Alfredo Torres Lozano. Aspectos básicos para el diseño de un generador de ozono, 2016. 2.3.4.1
- [13] Cyril Gomella and Henri Guerrée. Tratamiento de aguas para abastecimiento público, 1977. 2.3.4.1
- [14] S Pekárek. Non-thermal plasma ozone generation, 2003. 2.3.4.2
- [15] International Ozone Association. Ozone and it's application, 2016. 2.3.5
- [16] Leentech. Water treatment solutions, 2019. 2.3.5.1
- [17] Diógenes Hernández. Ozone generation from photovoltaic energy for water decontamination, 2021. 2.3.5.1
- [18] A.A. Zamuriev V.I. Golota, G.V. Taran. Develoment of ozone-dynamic technology for processing of used tires, 2015. 2.3.5.2, 2.3.5.2, 2.3.5.2
- [19] Minitab Support. Diseños factoriales y factoriales fraccionados, 2018. 3.2.3, A.1.1.1, A.1.1.2, A.1.1.3, A.1.1.4, A.1.2.1, A.1.2.2, A.1.2.3, A.1.2.4
- [20] Jan Rychlewski. On hooke's law, 1984.
- [21] Tommy Edeskar. Technical and environmental properties of tyre shreds focusing on ground engineering applications, 2004. 3.2.7

- [22] Cochilco. Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre, 2020. 4.2.3.2
- [23] Ching-Shui Cheng. Theory of factorial design, 2016. A.1
- [24] Rahul Mukerjee and CF Jeff Wu. A modern theory of factorial design, 2007. A.1
- [25] Frank Yates and Kenneth Mather. Ronald aylmer fisher, 1890-1962, 1963. A.1.2.1
- [26] Ronald A Fisher. The arrangement of field experiments, 1992. A.1.2.3
- [27] Rui Xu and Don Wunsch. Clustering, 2008. A.2, A.2
- [28] T Soni Madhulatha. An overview on clustering methods, 2012. A.2.1

A | ANEXO

A.1. DISEÑO FACTORIAL

Una de las dificultades fundamentales dentro de un experimento comparativo es la variabilidad presente en las unidades experimentales. Dos experiencias no tienen exactamente la misma exactitud y calidad, además de otras variaciones que pueden estar presentes en el control de la experimentación, en consecuencia, los efectos adversos en muchas ocasiones pueden ser incontrolables, generando variaciones. Una solución a este problema es la generación de repeticiones que disminuyan el error presente en estas mediciones [23].

Es denominado como diseño factorial o experimento factorial cuando existe dos o más factores que inciden en la ocurrencia de un fenómeno. Los diseños factoriales han tomado un rol prominente en la teórica y ejecución de diseños experimentales, debido a la eficiencia y bajos costos que esto implica considerando la cantidad de variables de entrada que se pueden tener. Los problemas experimentales pueden ser clasificados en 5 categorías de acuerdo con sus objetivos, 1) experimentos de comparación, 2) escenarios de variables, 3) respuesta ante un experimento de exploración, 4) sistemas de optimización y 5) sistemas robustos. A excepción de los experimentos de comparación, donde existen dos factores que influyen en una respuesta, los problemas tratados por diseños factoriales envuelven una cantidad múltiple de variables para el desarrollo de una respuesta ante un factor o estímulo [24].

A.1.1. COEFICIENTES DEL MODELO

A.1.1.1. COEFICIENTES

El coeficiente describe la magnitud y la dirección de la relación entre un término en el modelo y la variable de respuesta. En el caso de las variables de proceso, se calculan los coeficientes para los valores codificados. Los coeficientes positivos de los términos de interacción indican que los componentes del término actúan sinérgicamente. Es decir, el valor de la respuesta media es mayor que el valor que se obtendría calculando la media simple de la respuesta para cada mezcla pura. Los coeficientes negativos de los términos de interacción indican que los componentes de la mezcla actúan de manera antagónica. Es decir, el valor de la respuesta media es menor que el valor que se obtendría

calculando la media simple de la respuesta para cada mezcla pura [19].

A.1.1.2. ERRORES

El error estándar del coeficiente estima la variabilidad entre las estimaciones de los coeficientes que se obtendrían si se tomaran muestras repetidamente de la misma población. El cálculo supone que el tamaño de la muestra y los coeficientes a estimar seguirían siendo los mismos si la muestra se tomara varias veces. El error estándar del coeficiente se utiliza para medir la precisión de la estimación del coeficiente. Cuanto menor sea el error estándar, más precisa será la estimación [19].

A.1.1.3. VALOR T

El valor t mide la relación entre el coeficiente y su error estándar. Es posible utilizar el valor t para determinar si se puede rechazar la hipótesis nula. Sin embargo, el valor p se usa con más frecuencia, porque el valor umbral para rechazar la hipótesis nula no depende de los grados de libertad. [19].

A.1.1.4. FIV

El factor de inflación de la varianza (FIV) indica cuánto se infla la varianza de un coeficiente debido a las correlaciones entre los predictores incluidos en el modelo. Se utilizan los FIV para describir cuánta multicolinealidad (que es la correlación entre los predictores) existe en un análisis de regresión. La multicolinealidad es problemática porque puede aumentar la varianza de los coeficientes de regresión, lo que hace difícil evaluar el impacto individual que cada uno de los predictores correlacionados tiene sobre la respuesta. Cuando $FIV = 1$ los factores no están correlacionados, para un FIV entre 1 y 5 los factores están moderadamente correlacionados, finalmente, para un FIV mayor a 5, los factores están altamente correlacionados [19]. Un valor de FIV mayor que 5 sugiere que el coeficiente de regresión se estimó de manera deficiente debido a una fuerte multicolinealidad.

A.1.2. ANÁLISIS DE LA VARIANZA

A.1.2.1. ANÁLISIS DE YATES

La técnica del análisis de Yates, consiste principalmente en racionar el número total de elementos mediante sumas de cuadrados, siendo resumido en un ANOVA, lo cual corresponde a un análisis de las varianzas presentes en un experimento. En la Ecuación A.1 es posible observar la suma de cuadrados total demostradas en este análisis [25].

$$SC_{Total} = SC_{Error} + SC_{Tratamientos} \quad (A.1)$$

Donde los grados de libertad pueden ser distribuidos de una forma equivalente especificando distribuciones X^2 que detallan las sumas asociadas de los cuadrados.

$$gl_{Total} = gl_{Error} + gl_{Tratamientos} \quad (A.2)$$

El total de grados de libertad depende del número de observaciones. En un diseño de mezcla el total de grados de libertad es igual al número de observaciones menos 1 [19].

A.1.2.2. CUADRADOS MEDIOS

Los cuadrados medios determinan la variación de un término o modelo, independiente de su orden en el modelo. Los cuadrados medios son utilizados para calcular los valores p presentes en un ANOVA, siendo generalmente interpretados los valores p y el estadístico R^2 en lugar de los cuadrados medios [19].

A.1.2.3. PRUEBA DE FISHER

La prueba de Fisher [26] es utilizada para generar comparaciones de los componentes presentes en una desviación total. En la Ecuación A.3 se puede observar la ecuación general teórica de una prueba de Fisher.

$$F = \frac{\text{Varianza de las medias del grupo}}{\text{Media de la varianza dentro del grupo}} \quad (A.3)$$

La prueba de Fisher generalmente es usada para determinar el valor p , el cual posteriormente es utilizado para tomar una decisión acerca de la significancia estadística de la prueba realizada. El valor F puede ser comparado con el valor crítico para determinar la aprobación o el rechazo de la hipótesis nula [19].

A.1.2.4. VALOR P

El valor p es definido como una probabilidad que mide la evidencia en contra de una hipótesis nula. La hipótesis nula para una regresión en general es definida como una variación nula en la respuesta. Generalmente se utiliza un nivel de significancia de 0,05, indicando un riesgo del 5% de concluir que el modelo explica correctamente la variación de la respuesta.

Para un valor p menor a la significancia, se concluye que el modelo explica correctamente la variación de una respuesta ante los datos de entrada. Si el valor p es mayor a la significancia, se concluye que no hay suficiente evidencia para concluir que el modelo explica correctamente la variación de la respuesta [19].

A.2. CLUSTERING O AGRUPAMIENTO

El agrupamiento de datos es una técnica que ha ido en tendencia en los últimos años, debido al aumento de *data* en todas las disciplinas de la ciencia. Existen varios algoritmos y teorías que han variado en el tiempo con respecto al agrupamiento de datos, como es su traducción al español.

Los datos pueden describir ciertas propiedades de un fenómeno natural, o detalles de un experimento científico, y aun mas importante, los datos dan una base para un análisis y razonamiento para entender los detalles de un fenómeno [27].

Los algoritmos de agrupamiento generan grupos de datos en base a patrones, observaciones, unidades, entre otras características. En la Figura A.1 es posible observar un agrupamiento subjetivo en una ilustración que denota como es posible generar una separación [27].

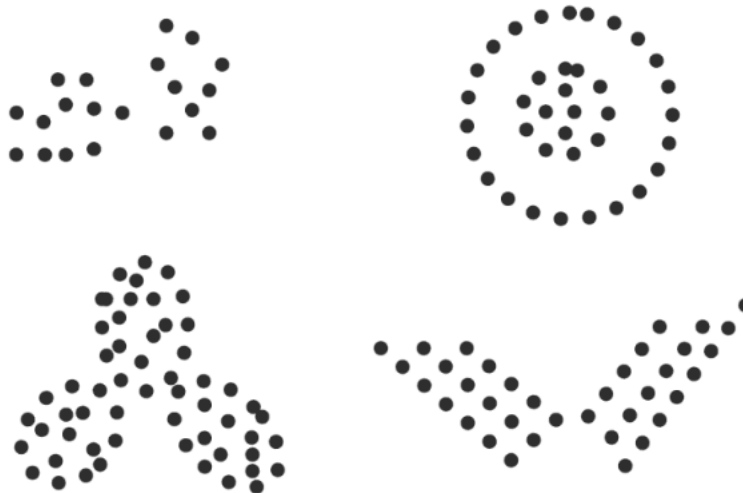


Figura A.1: Ilustración de un agrupamiento subjetivo (Rui Xun, Don Wunsch).

Existen cuatro etapas para un análisis mediante agrupamiento [27]:

1. **Característica de selección:** la primera etapa dentro de un análisis mediante agrupamiento, es elegir y distinguir la o las características que serán utilizadas para una separación dentro de un *set* de datos. Esta etapa puede ser determinada mediante las características mas representativas de una muestra, características que pueden demostrar un patrón para generar distintos grupos.
2. **Selección del algoritmo de agrupamiento:** los agrupamientos son realizados de acuerdo como un dato puede ser similar a otro, siendo predominante una característica principal dentro de todos los algoritmos, la media de proximidad. Si bien no todos los algoritmos utilizan una media de proximidad para establecer similitudes, esto es dependiente de las características que presente el dato dentro de la muestra. Esta etapa suele ser subjetiva.
3. **Validación del agrupamiento:** existen tres principales categorías para generar una validación del agrupamiento:

índices externos, índices internos e índices relativos. Los índices mencionados anteriormente dependen netamente de que, si la característica del dato a analizar tiene una dependencia interna o externa al medio, sin embargo, un índice relativo genera una comparación con agrupamientos ya establecidos utilizando una referencia para decidir si el agrupamiento es correcto.

4. **Interpretación de resultados:** la última etapa es para comprobar que el significado del agrupamiento con respecto a la información original puede entregar un entendimiento claro sobre la información presente.

A.2.1. TIPOS DE AGRUPAMIENTO

Los algoritmos de agrupamiento pueden ser jerárquicos o particionales. Los algoritmos jerárquicos pueden ser aglomerantes o disuasivos [28].

Dentro de los algoritmos particionales destaca el de *K-Means*, el cual asigna un punto de partida para el agrupamiento llamado centroide, y calcula la distancia de los datos con respecto a este centroide para generar distintos grupos, la medición de esta distancia suele ser mediante el método euclidiano. El algoritmo mencionado anteriormente es el más utilizado por diversos estudios, debido a la complejidad que presenta el algoritmo (relativamente baja), además de la versatilidad que presenta [28].

Existen otros algoritmos para generar agrupamientos dentro de los algoritmos particionales que son utilizados dependiendo de la base de datos a analizar, entre los cuales destacan los siguientes: *DBSCAN*, *SNV* [28].

Adicionalmente, existen dos clasificaciones que no son utilizadas habitualmente, las cuales corresponden a un agrupamiento en base a grillado y modelos base.

B | APÉNDICE

B.1. TABLAS

Tabla B.1: Detalle de las muestras utilizadas.

N	Peso [grs]	Alto [cm]	Largo [cm]	Ancho[cm]
1	68,83	8,01	5,42	1,93
2	68,72	10,15	4,93	1,9
3	58,48	8,51	4,46	1,94
4	71,05	9,3	5,07	2,22
5	71,72	9,95	4,63	1,83
6	67,13	9,72	4,94	1,71
7	66,35	10,44	4,23	2,27
8	77,05	10,18	5,27	1,71
9	69,61	9,75	4,89	1,85
10	59,15	9,91	4,04	1,92
11	57,78	8,25	4,52	1,62
12	53,79	8,23	4,45	1,64
13	74,45	10,27	4,64	1,78
14	62,68	9,7	4,79	1,77
15	68,24	9,82	5,01	1,67
16	73,11	8,96	5,2	1,92
17	59,18	8,87	4,92	1,69
18	56,06	8,38	4,52	1,68
19	76,29	10,73	5,03	1,87

N	Peso [grs]	Alto [cm]	Largo [cm]	Ancho[cm]
20	66,96	10,28	4,45	1,8
21	76,02	9,62	4,99	2,03
22	74,97	10,47	4,85	1,95
23	67,31	9,62	4,76	1,7
24	75,14	9,68	5,12	1,85
25	56,48	8,77	4,81	1,72
26	53,36	8,28	4,69	1,62
27	53,82	7,35	4,95	1,83
28	78,63	10,27	4,85	1,87
29	64,64	10,15	4,47	1,79
30	82,59	10,06	5,04	1,9
31	73,13	10,06	4,78	1,81
32	61,79	8,24	5,15	1,81
33	53,28	9,1	4,28	1,64
34	64,88	9,46	4,51	1,91
35	54,21	8,36	4,73	1,63
36	62,85	10,08	4,44	1,77
37	65,6	9,76	4,26	1,83
38	75,08	9,55	6,1	1,99

Tabla B.2: Pasos de amalgamación del agrupamiento de muestras.

Paso	Número de conglomerados	Nivel de semejanza	Nivel de distancia	Conglomerados incorporados		Nuevo conglomerado	Número de observaciones en el nuevo conglomerado
1	37	98,2753	0,05831	6	9	6	2
2	36	97,8467	0,07280	11	12	11	2
3	35	97,7474	0,07616	29	36	29	2
4	34	97,4729	0,08544	14	23	14	2
5	33	97,3545	0,08944	26	35	26	2
6	32	95,8910	0,13892	6	15	6	3
7	31	95,7962	0,14213	2	30	2	2
8	30	95,7651	0,14318	3	18	3	2
9	29	95,7651	0,14318	21	24	21	2
10	28	95,6030	0,14866	17	25	17	2
11	27	94,4983	0,18601	5	31	5	2
12	26	94,3725	0,19026	13	20	13	2
13	25	94,0845	0,20000	22	28	22	2
14	24	92,8891	0,24042	6	21	6	5
15	23	92,1244	0,26627	10	37	10	2
16	22	91,8407	0,27586	13	29	13	4
17	21	91,7130	0,28018	3	11	3	4
18	20	90,3793	0,32527	3	26	3	6
19	19	89,9046	0,34132	2	8	2	3
20	18	89,5094	0,35468	1	32	1	2
21	17	89,2336	0,36401	4	16	4	2
22	16	89,2052	0,36497	6	14	6	7
23	15	88,2692	0,39661	5	13	5	6
24	14	87,3645	0,42720	33	34	33	2
25	13	85,3898	0,49396	19	22	19	3
26	12	82,5392	0,59034	4	17	4	4
27	11	80,2273	0,66851	5	7	5	7
28	10	80,1809	0,67007	2	19	2	6
29	9	77,6675	0,75505	5	10	5	9

Paso	Número de conglomerados	Nivel de semejanza	Nivel de distancia	Conglomerados incorporados		Nuevo conglomerado	Número de observaciones en el nuevo conglomerado
30	8	73,0195	0,91220	1	27	1	3
31	7	72,4754	0,93059	4	33	4	6
32	6	68,3852	1,06888	4	6	4	13
33	5	62,7546	1,25925	1	3	1	9
34	4	61,9782	1,28550	2	5	2	15
35	3	44,5479	1,87481	4	38	4	14
36	2	38,1469	2,09122	2	4	2	29
37	1	0,0000	3,38095	1	2	1	38

B.2. FIGURAS Y GRÁFICOS

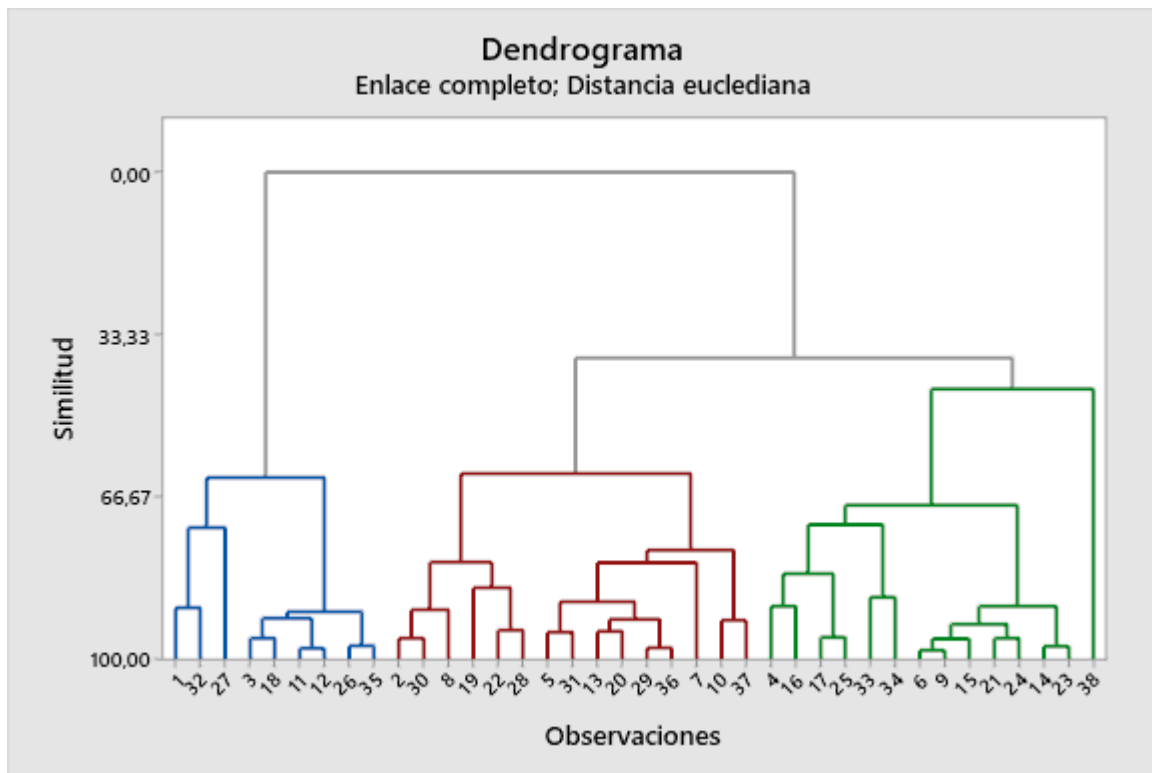


Figura B.1: Dendrograma del agrupamiento de las muestras.

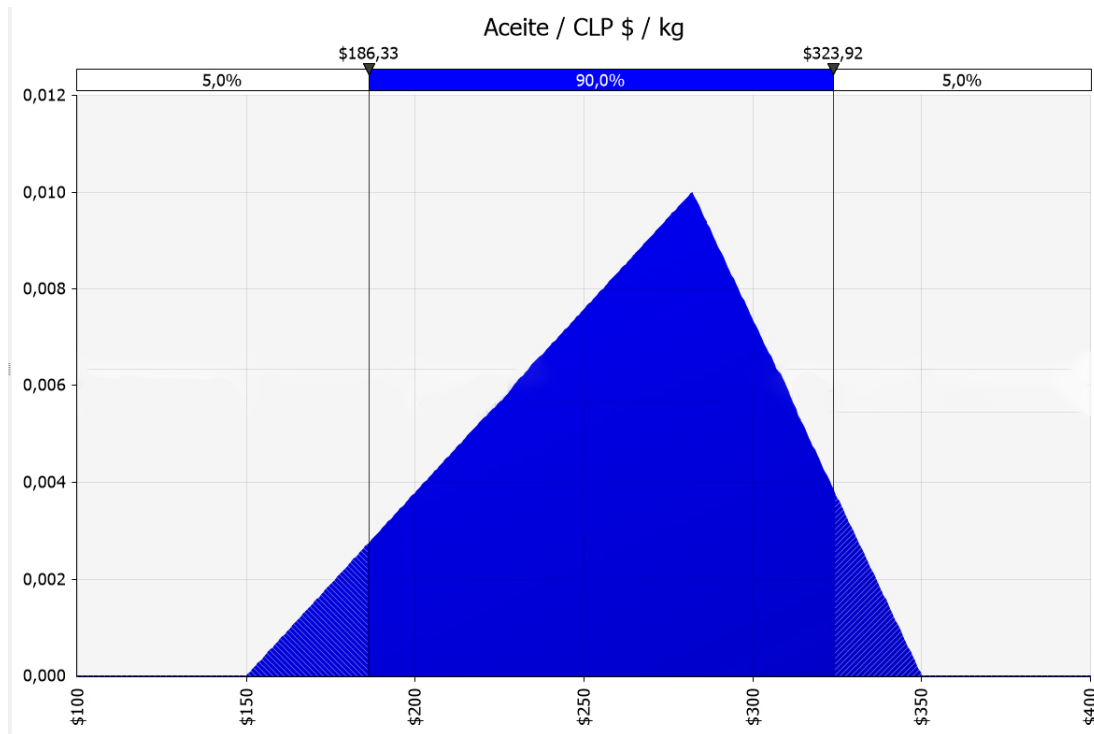


Figura B.2: Gráfica de probabilidad para el Aceite Pirolítico.

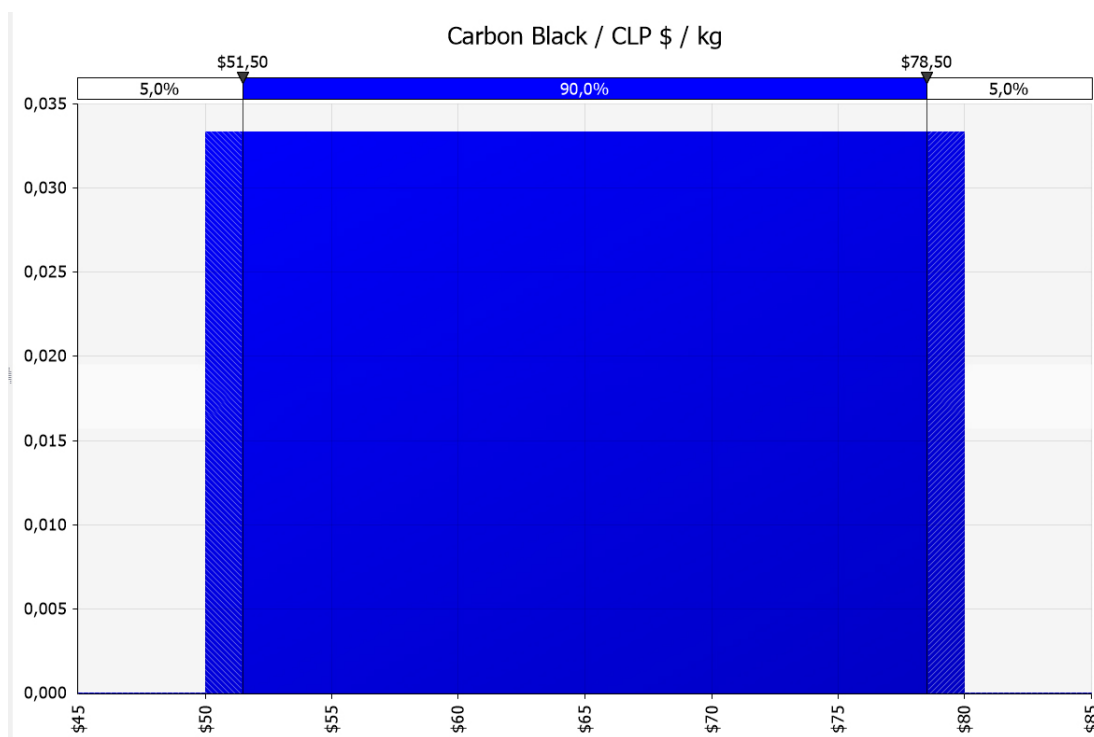


Figura B.3: Gráfica de probabilidad para el Carbón Black.

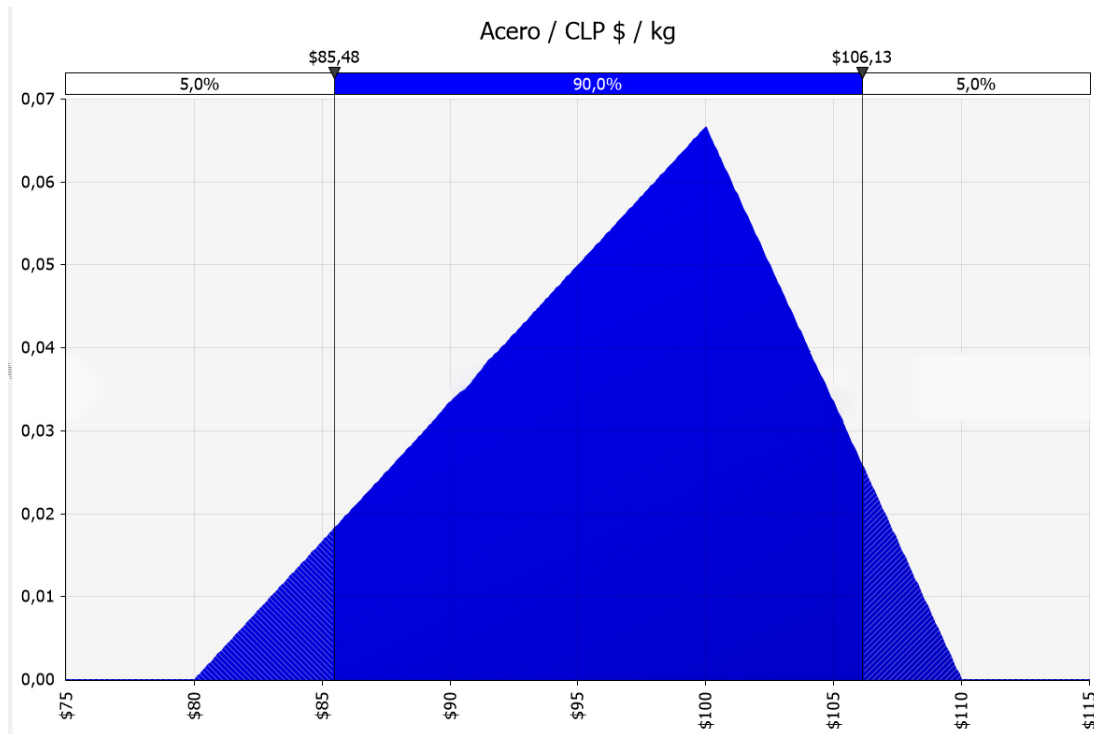


Figura B.4: Gráfica de probabilidad para el Acero.

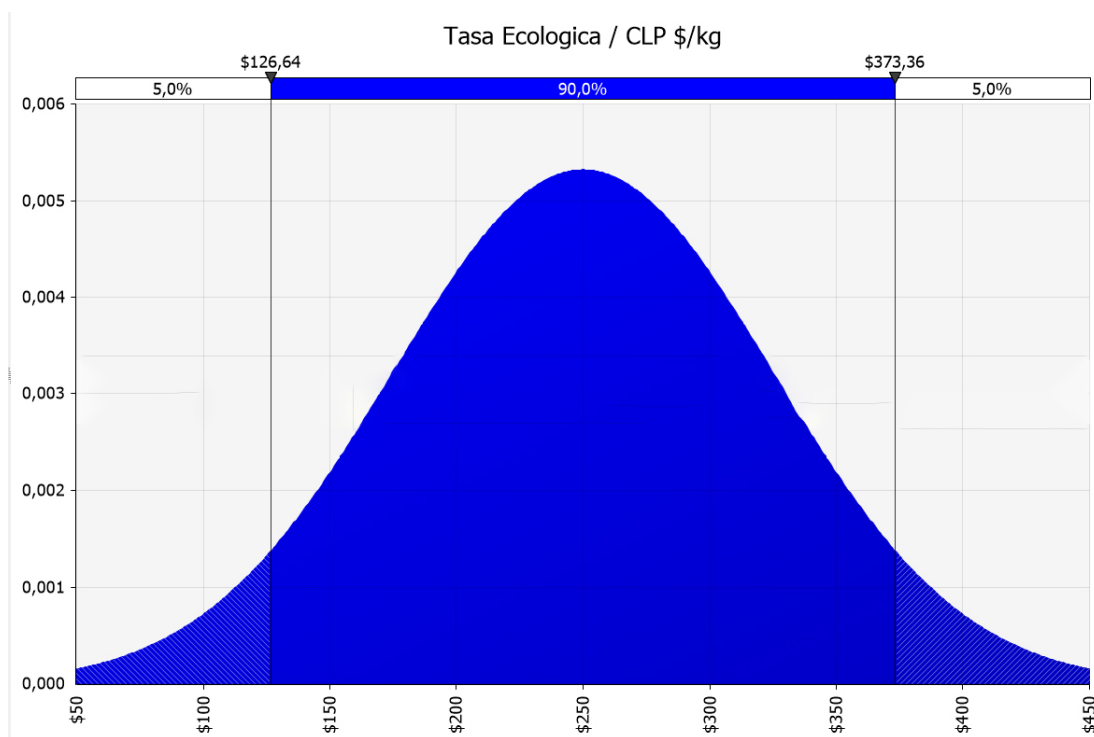


Figura B.5: Gráfica de probabilidad para la Tasa Ecológica.

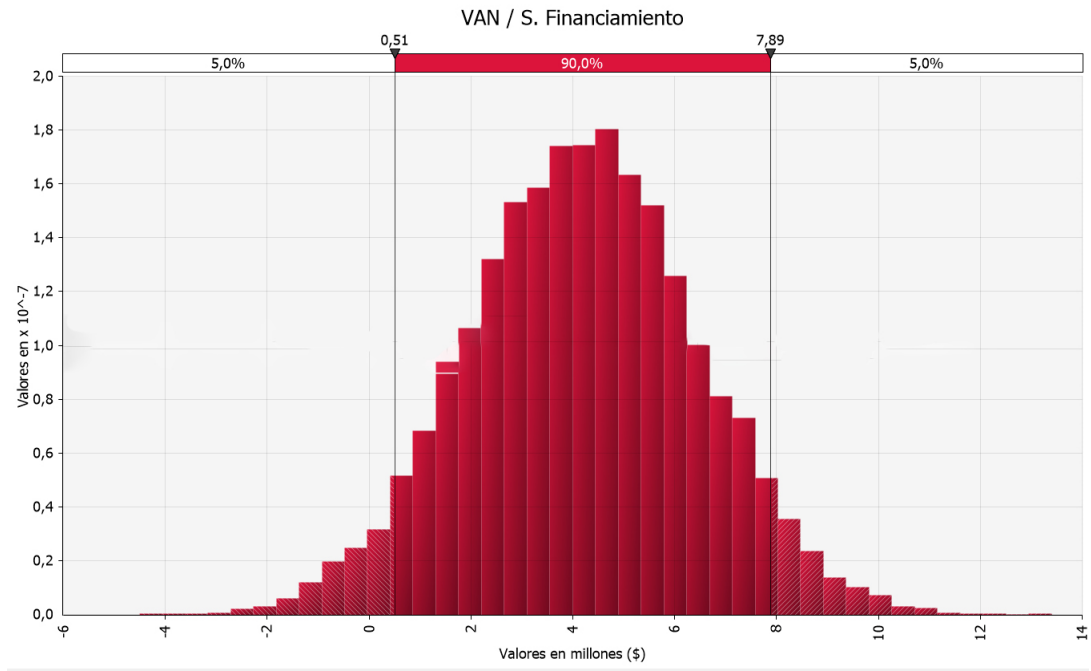


Figura B.6: Gráfica para el VAN sin financiamiento simulado.

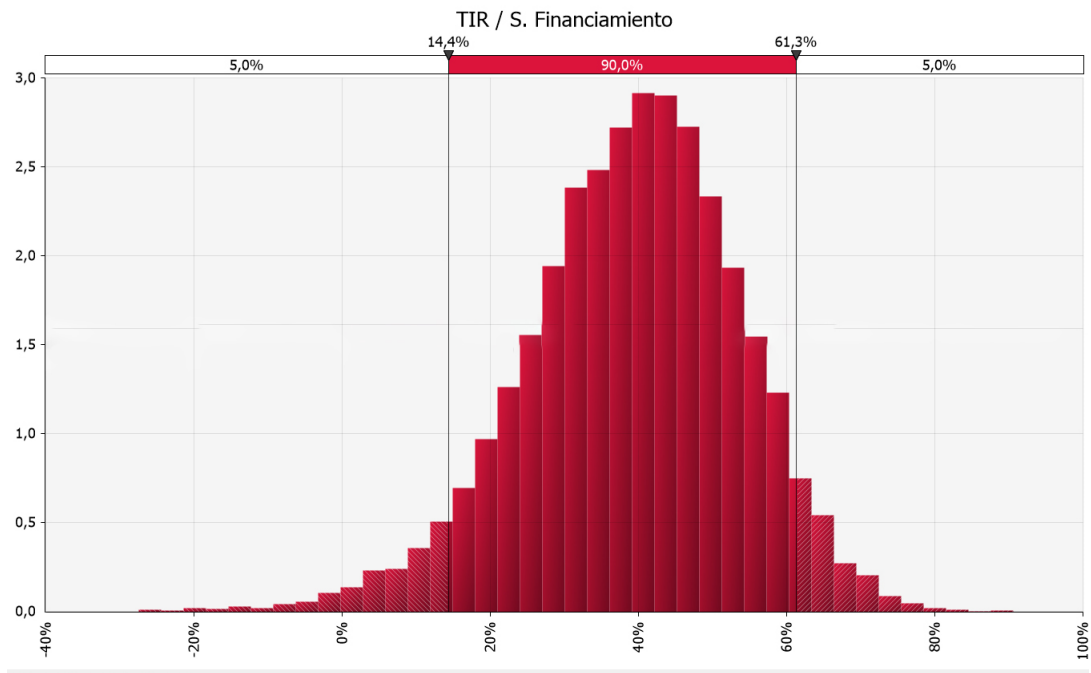


Figura B.7: Gráfica para el TIR sin financiamiento simulado.

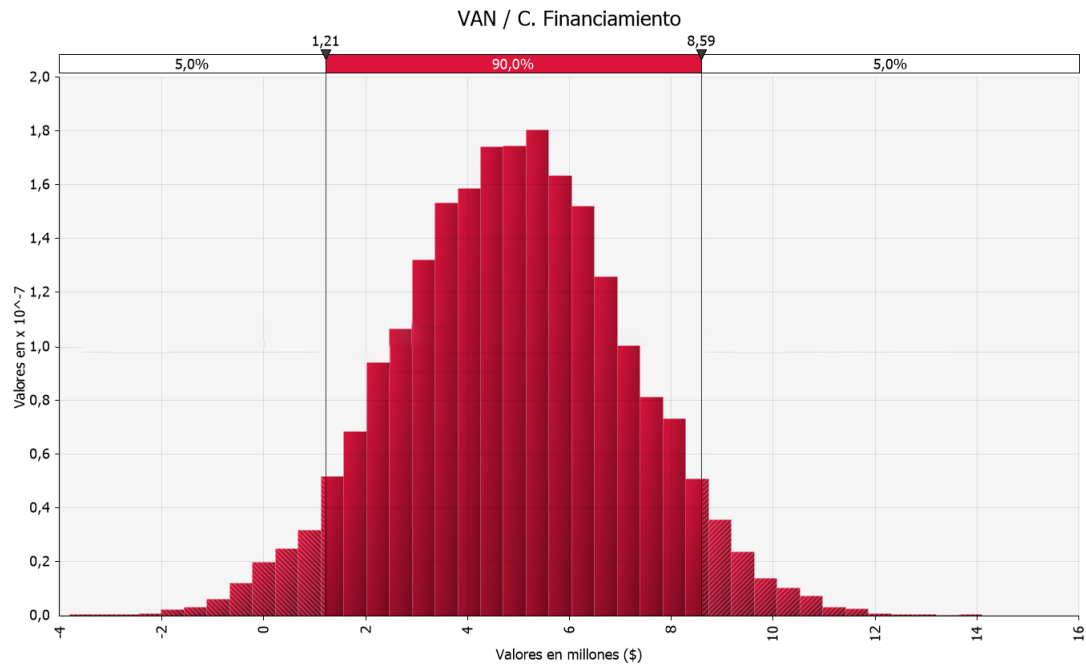


Figura B.8: Gráfica para el VAN con financiamiento simulado.

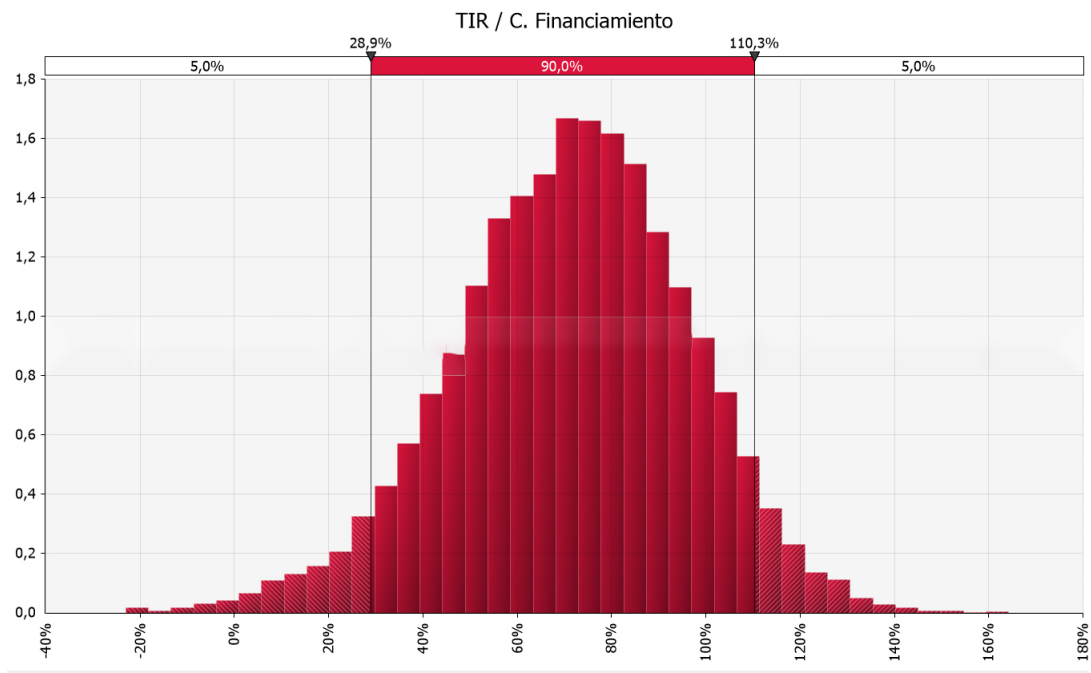


Figura B.9: Gráfica para el TIR con financiamiento simulado.

B.3. FOTOGRAFÍAS



Figura B.10: Fotografía de un trozo de neumático siendo sometido a una ozonificación intermitente.



Figura B.11: Fotografía de un trozo de neumático siendo sometido a una inyección constante de ozono en un ambiente líquido de agua destilada.

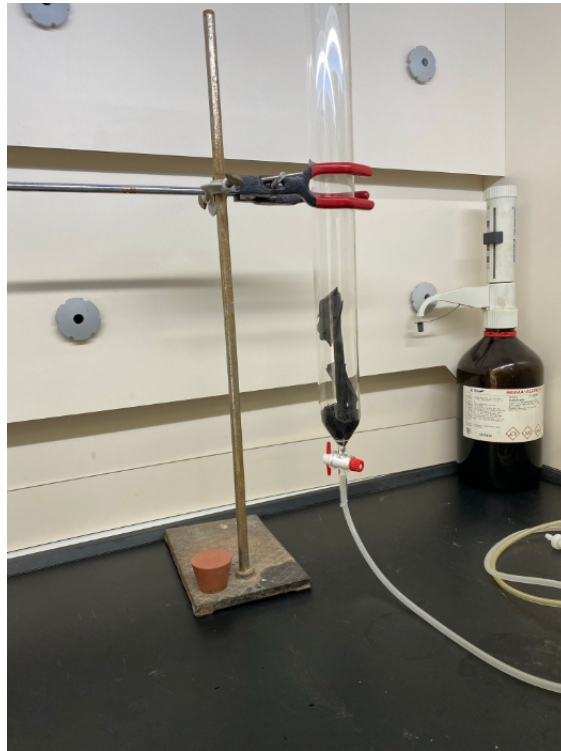


Figura B.12: Fotografía de un trozo de neumático siendo sometido a una inyección constante de ozono en un ambiente líquido de aceite vegetal.

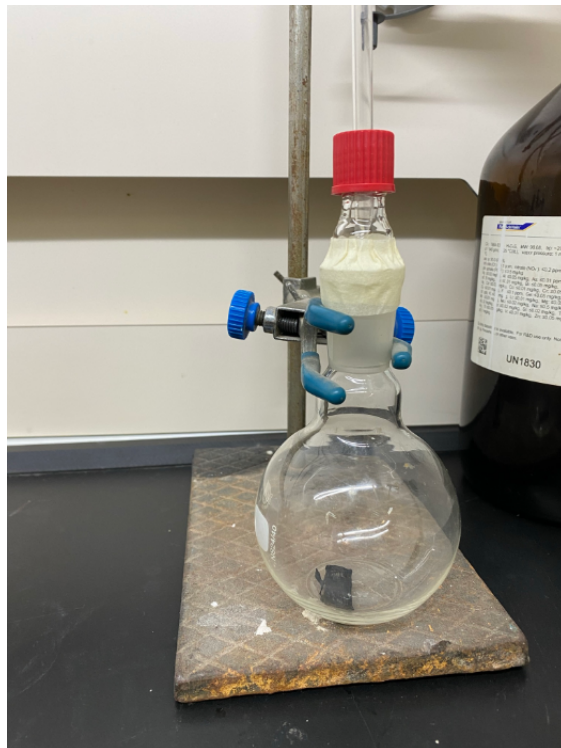


Figura B.13: Fotografía de un trozo de neumático siendo sometido a una inyección constante de ozono en un ambiente sin aditivos.



Figura B.14: Fotografía de las muestras proporcionadas por *Metaproject*.

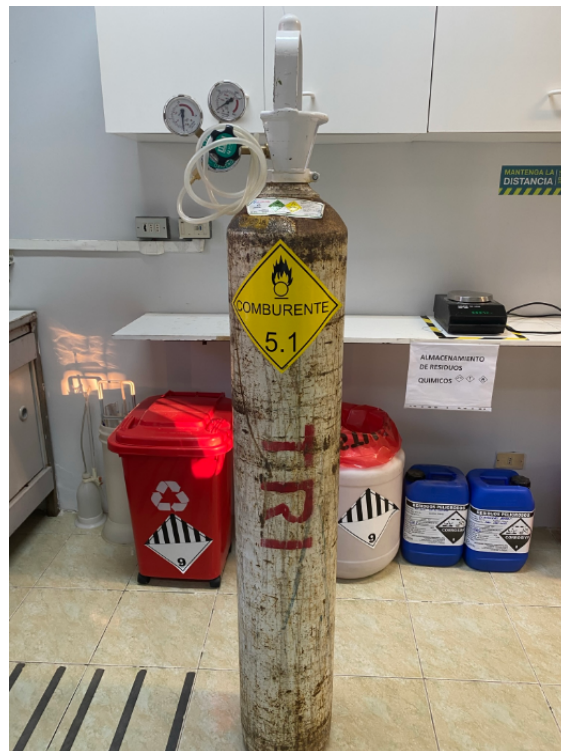


Figura B.15: Fotografía del tanque de oxígeno utilizado.



Figura B.16: Fotografía del generador de ozono utilizado.



Figura B.17: Fotografía del sensor de ozono utilizado.

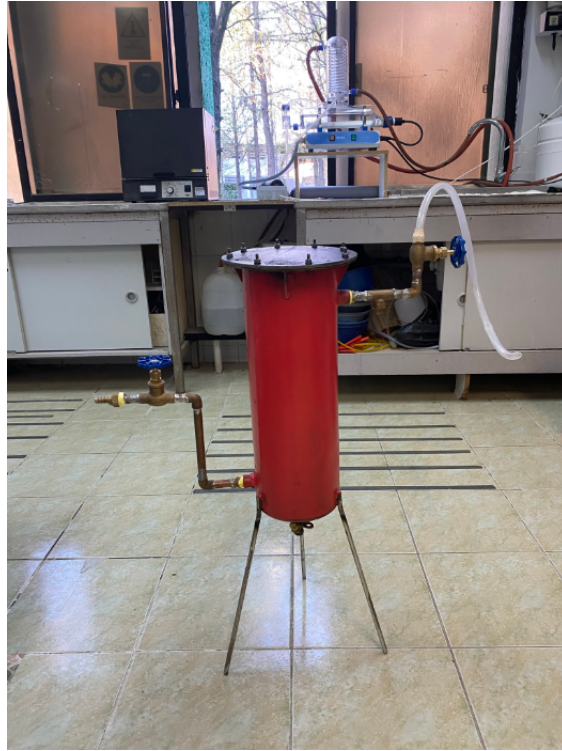


Figura B.18: Fotografía del reactor de ozonificación utilizado.



(a) Muestra antes de ser ozonizada.



(b) Muestra después de ser ozonizada.

Figura B.19: Fotografías de la primera situación de éxito.



Figura B.20: Fotografía del sistema de tensión elaborado.