

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DE LA
COMBUSTIÓN Y GASIFICACIÓN DE
NEUMÁTICOS FUERA DE USO”**

JOSÉ TOMÁS CÉSPEDES SANTANDER

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: DR.ING. JAIME NÚÑEZ S.**

JUNIO – 2014

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas las personas que hicieron posible esta investigación, brindando un constante apoyo y guía, considero que sería injusto no nombrar a los profesores Mario Toledo, Karina Araus, Jorge Valdés y Jaime Núñez, al profesor Joaquín Díaz de Valdés por su buena disposición a mis amigos Sebastián Vásquez, Claudio Silvestre, Milan Vlahovic, Fabián Muñoz y a todas las demás personas que me brindaron sus conocimientos en las diferentes etapas de este trabajo de investigación.

Finalmente y no menos importante agradecer a mis padres quienes me han brindado un apoyo incondicional en la vida.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación desarrolla el estudio experimental de la combustión y gasificación híbrida de neumáticos fuera de uso en un reactor de medios porosos. El trabajo comienza con el estudio del marco teórico sobre la valorización física y energética de los neumáticos, los procesos térmicos a los que es sometido y la base teórica de los sistemas utilizados para el análisis de residuos como la cromatografía gaseosa y la espectrometría de rayos X.

Se ha diseñado e implementado un reactor de medios porosos inertes formado con esferas de alúmina (Al_2O_3) que permite la inyección de vapor, aire y gas natural en base a modelos y diseños anteriores, esto permite estudiar los fenómenos y las características de la gasificación, tales como: las temperaturas máximas, la velocidad del frente de llama y productos como el H_2 , CO y CO_2 a partir de estas reacciones. También se toman muestras sólidas en papel filtro para su posterior análisis elemental y semi-cuantitativo.

Los resultados experimentales muestran que la gasificación no puede ser llevada a cabo solo con inyección de vapor. Sin embargo es posible sostener altas temperaturas sobre los $1100\text{ [}^\circ\text{C]}$ para las modalidades de operación que utilizan flujo de aire o mezclas aire, gas natural y vapor. Existe una estrecha relación entre la disminución de la cantidad de H_2 producido y el aumento en el porcentaje de vapor. Se observó el desplazamiento térmico del reactor lo que permite el cálculo de la velocidad de propagación del frente de llama. Se detectó la emisión de grandes cantidades de Zinc en las experiencias.

Finalmente se realiza un estudio de las variables relevantes para el escalamiento del reactor, éstas fueron la velocidad de filtración y la comparación de otras alternativas en la disposición final del NFU mediante el cálculo de los ingresos por venta de los productos finales. A pesar de que no existe el modelo de costos de las distintas alternativas, se concluye que la producción y venta de hidrogeno puro resulta una alternativa interesante de evaluar económicamente.

ABSTRACT

This work develops the experimental study of combustion and gasification of used tires in a porous media reactor. The work begins with the study of theoretical framework on physical and tire energy recovery, thermal processes used and the theoretical basis of the systems used for the analysis of residues such as gas chromatography and X-Ray spectrometry.

It has been design and implemented a hybrid burner of porous media formed with alumina spheres and waste tires, that allows the injection of steam, air and natural gas using models and previous designs. With this equipment, can be study the gasification of waste tires, like for example the maximum temperatures, the speed of the combustion front, and products as H₂, CO and CO₂ from these reactions.. Solids samples also were taken on filter paper for subsequent elemental and semi-quantitative analysis.

Experimental results show that gasification can't be performed only with steam injection, however it's possible maintain temperatures above 1100 [°C] for operating modes that use airflow, in this mode the trends of maximum operating temperatures are not mostly influenced by other gasification agents. There is a close relationship between the decrease of the amount of H₂ produced and the increase in the percentage of steam. Thermal movement of the reactor was observed by calculating the speed of the propagation front and the release of large quantities of Zinc in this process was observed.

Finally was studied the relevant scaling variables for the reactor; these were the filtration velocity and the comparison of alternatives for final disposal of waste tires by calculating the gross revenues from sales of final products. Although there is no cost model in this comparison for the alternatives, it's concluded that the production and sale of pure hydrogen is an interesting alternative for economic evaluation.

Keywords: Gasification, used tires, porous media burner, combustion, Hydrogen.

GLOSARIO

T	: Temperatura
C_p	: Calor específico
Q_c	: Energía liberada
Q_a	: Energía adherida
H	: Entalpía
h	: Altura de reactor para zona híbrida
I	: Intensidad del haz de luz reflejado
I_0	: Intensidad del haz de luz incidente
d	: Espesor de placa
ρ	: Densidad
μ	: Coeficiente de atenuación másica
M_x	: Masa molecular del elemento x
X_x	: Fracción volumétrica del elemento x
m	: Masa
V	: Volumen
Y_x	: Fracción másica del elemento x.
\dot{m}	: Caudal másico
\dot{V}	: Caudal volumétrico
ϕ	: Relación de equivalencia
R	: Constante de gas ideal
R_u	: Constante universal de los gases 8314 [J/kmolK]
v	: Velocidad de propagación del frente de combustión
t	: Tiempo

ε	: Porosidad
D	: Diámetro interior del reactor
TPD	: Tonelada por día
TPA	: Tonelada por año

Subíndice

C	: Carbono
H	: Hidrógeno
N	: Nitrógeno
O	: Oxígeno
S	: Azufre
comb	: Combustible
a	: Aire
a,e	: Aire estequiométrico
g,e	: Mezcla de gases de escape producto de la gasificación de NFU.
mezcla	: Mezcla aire más combustible
l	: Vapor condensado
liq	: Líquido saturado
vap	: Vapor saturado
0	: Condición termodinámica normal
f	: Final
i	: Inicial
r	: residencia
NFU	: Neumático fuera de uso.
T	: Total

Superíndice

(0) : Condición normalizada.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
GLOSARIO	5
Subíndice	6
Superíndice	7
TABLAS	11
GRÁFICOS	12
FIGURAS	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS	15
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1 NEUMÁTICOS FUERA DE USO	16
3.1.1 Parque de Vehículos en circulación en Chile.....	16
3.1.2 Diagnóstico nacional de NFU	19
3.1.3 Características Físicas del neumático.....	21
3.1.4 Propiedades energéticas del neumático.....	24
3.1.5 Proceso térmicos en NFU.	27
3.1.6 Negro de Carbón	35
3.2 GAS DE SINTESIS	37
3.2.1 Métodos de obtención de gas de síntesis.....	38
3.3 COMBUSTIÓN EN MEDIOS POROSOS INERTES	39
3.3.1 Exceso de entalpía.....	43
3.3.2 Aplicaciones de la tecnología de MPI.....	44
3.4 CROMATOGRAFÍA GASEOSA	45
3.5 ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS - X	47
3.5.1 Interacción de los Rayos X con la materia.....	50
4. TRABAJO EXPERIMENTAL	51
4.2 TRABAJOS EXPERIMENTALES PREVIOS	51
4.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	52

4.3.1	Diseño de reactor de medio poroso inerte.....	53
4.3.2	Sistema de suministro y control de flujos	55
4.3.3	Sistema de captación y análisis de residuos.....	56
4.4	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	59
4.4.1	Descripción de ensayos.....	59
4.4.2	Cálculo de flujo para mezclas aire combustible.....	61
4.4.3	Cálculo de flujo de vapor.....	66
4.4.4	Descripción de muestras de NFU.....	67
4.4.5	Cálculo de velocidad del frente de combustión.....	68
4.4.6	Procedimiento para puesta en marcha y precalentamiento del reactor.....	69
4.4.7	Procedimiento para inyección de vapor.....	70
4.4.8	Procedimiento para combustión de neumáticos.....	71
4.4.9	Procedimiento para cromatografía gaseosa.....	72
4.4.10	Procedimiento para captación de residuos sólidos.....	72
4.4.11	Procedimiento para espectrometría mediante fluorescencia de rayos – X.....	73
4.4.12	Procedimiento para apagado del reactor.....	74
4.4.13	Procedimiento para apagado del cromatógrafo.....	74
5.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	75
5.1	CONJUNTO 1: ENSAYOS CON FLUJO DE AIRE/VAPOR Y RELACIÓN HÍBRIDA 50-50%.....	75
5.1.1	Perfiles de temperatura en función del tiempo.....	75
5.1.2	Temperaturas máximas y velocidad del frente de combustión	78
5.1.3	Resultados espectrometría de rayos – X	79
5.1.4	Resultados de cromatografía gaseosa.....	80
5.1.5	Análisis de resultados conjunto 1.....	80
5.2	CONJUNTO 2: ENSAYOS CON FLUJO DE VAPOR Y RELACIÓN HÍBRIDA 50-50%.....	82
5.2.1	Perfiles de temperaturas en función del tiempo.....	82
5.2.2	Temperaturas máximas medidas	83
5.2.3	Resultados espectrometría de rayos – X	84
5.2.4	Resultados cromatografía gaseosa	85
5.2.5	Análisis de resultados conjunto 2.....	86

5.3	CONJUNTO 3: ENSAYOS CON FLUJO DE VAPOR Y RELACIÓN HIBRIDA 25-75%	87
5.3.1	Perfiles de temperaturas en función del tiempo.	87
5.3.2	Temperaturas máximas medidas.....	89
5.3.3	Resultados espectrometría de rayos – X.....	90
5.3.4	Resultados de cromatografía gaseosa.....	91
5.3.5	Análisis de resultados conjunto 3.....	92
5.4	CONJUNTO 4: ENSAYOS CON FLUJO DE AIRE/VAPOR/GAS NATURAL Y RELACIÓN HIBRIDA 50-50%	93
5.4.1	Perfiles de temperaturas en función del tiempo.	93
5.4.2	Temperaturas máximas y velocidad del frente de combustión	96
5.4.3	Resultados espectrometría de rayos – X.....	97
5.4.4	Resultados de cromatografía gaseosa.....	98
5.4.5	Análisis de resultados conjunto 4.....	98
5.5	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONJUNTO DE RESULTADOS	100
5.5.1	Temperaturas máximas de combustión.....	100
5.5.2	Velocidad de propagación del frente de combustión	101
5.5.3	Productos de la combustión	103
5.5.4	Captación de residuos sólidos	106
6.	ESCALAMIENTO DEL REACTOR	108
6.1	PRODUCTO COMERCIAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DEL NEUMÁTICO	108
6.1.1	Estimación de la producción de hidrógeno en el laboratorio.	109
6.1.2	Estudio del valor comercial del hidrógeno.....	111
6.2	COSTOS DE ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE NFU	112
6.3	ALTERNATIVAS SIMILARES EN LA GASIFICACIÓN DE NEUMÁTICOS	115
6.4	VARIABLES PARA EL DISEÑO DEL REACTOR	117
6.5	COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS	119
7.	CONCLUSIONES	120
8.	BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXO A:	RESULTADOS DE ESPECTRÓMETRÍA DE RAYOS X	130
A.1	ESPECTRO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO	130

A.2 ESPECTRO DE AISLANTE TÉRMICO CERÁMICO	130
A.3 ESPECTRO PAPEL FILTRO LIMPIO	131
A.4 ESPECTRO CARACTERÍSTICO DE PAPEL FILTRO SATURADO	132
A.5 ESPECTRO POLVO DE NFU	133
ANEXO B: PRESENTACIÓN DE PAPEL FILTRO	134
ANEXO C: RELACIÓN DE EQUIVALENCIA PARA MEZCLA HÍBRIDA	137
ANEXO D: PERFIL DE TEMPERATURA EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LAS TERMOCUPLAS	139

TABLAS

Tabla 1. Parque de vehículos por tipo de transporte, total país [1].	17
Tabla 2. Distribución de vehículos en circulación por región, 2012 [2].	18
Tabla 3. Componentes del Neumático, Fuente CINC.	23
Tabla 4. Comparación de las características químicas NFU vs Carbón [11].	25
Tabla 5. Energía utilizada para fabricar 1kg de neumático [12].	26
Tabla 6. Regímenes de propagación de la llama en MPI [24].	41
Tabla 7. Ensayos experimentales	60
Tabla 8. Flujos de aire y combustible para distintas relaciones de equivalencia.	66
Tabla 9. Volumen específico del agua para distintas fases.	66
Tabla 10. Volumen específico del agua para distintas fases.	67
Tabla 11. Volumen de NFU para gasificar.	68
Tabla 12. Temperaturas máximas y velocidad de propagación conjunto 1.	78
Tabla 13. Resultados de espectrometría Ensayo N°1.	79
Tabla 14. Resultados de espectrometría Ensayo N°2.	79
Tabla 15. Resultados de espectrometría Ensayo N°3.	79
Tabla 16. Resultados de espectrometría Ensayo N°4.	80
Tabla 17. Resultados de cromatografía gaseosa conjunto 1 de ensayos.	80
Tabla 18. Temperaturas máximas y velocidad de propagación conjunto 2.	84
Tabla 19. Resultados de espectrometría para ensayo No.5.	85
Tabla 20. Resultados de espectrometría para ensayo No.6.	85
Tabla 21. Resultados de espectrometría para ensayo No.7.	85
Tabla 22. Resultados de cromatografía gaseosa conjunto 2.	86
Tabla 23. Temperaturas máximas y velocidad de propagación conjunto 3.	89
Tabla 24. Resultados de espectrometría para ensayo No.8.	90
Tabla 25. Resultados de espectrometría para ensayo No.9.	91
Tabla 26. Resultados de espectrometría para ensayo No.10.	91
Tabla 27. Resultados de cromatografía gaseosa conjunto 3 de ensayos.	91
Tabla 28. Temperaturas máximas y velocidad de propagación conjunto 4.	96

Tabla 29. Resultados de espectrometría para ensayo No.11.....	97
Tabla 30. Resultados de espectrometría para ensayo No.12.....	97
Tabla 31. Resultados de espectrometría para ensayo No.13.....	97
Tabla 32. Resultados de espectrometría para ensayo No.14.....	98
Tabla 33. Resultados de cromatografía gaseosa conjunto 4 de ensayos.....	98
Tabla 34. Resumen de elementos medidos para todos los tipos de muestra.....	107
Tabla 35. Volumen de H ₂ , punto óptimo de operación.....	110
Tabla 36. Metas de recuperación y destinos de NFU por escenario [3].....	112
Tabla 37. Recuperación de materia prima secundaria de NFU [3].....	113
Tabla 38. Ingresos brutos estimados de la gasificación de NFU [50].....	116
Tabla 39. Estimación de costos de capital, de operación y mantención (O&M) para gasificación de NFU [50].....	116
Tabla 40. Comparación de ingresos brutos para gasificación de NFU.....	119
Tabla 41. Relación de equivalencia para conjunto 1 de ensayos.....	138

GRÁFICOS

Gráfico 1. Vehículos en circulación, por tipo de transporte (porcentajes 2012) [2].....	17
Gráfico 2. Crecimiento promedio anual del parque vehicular (2006 – 2011) [2].....	18
Gráfico 3. Productos derivados de la PGL de NFU [13].	33
Gráfico 4. Perfil de temperatura para 0% Vapor, 8 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.....	76
Gráfico 5. Perfil de temperatura para 20% Vapor, 8 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.....	76
Gráfico 6. Perfil de temperatura para 40% Vapor, 8 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.....	77
Gráfico 7. Perfil de temperatura para 60% Vapor, 8 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.....	77
Gráfico 8. Distribución de temperaturas máximas para el conjunto 1 de ensayos.....	78
Gráfico 9. Perfil de temperatura para 20% Vapor, 0 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.....	82
Gráfico 10. Perfil de temperatura para 40% Vapor, 0 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.....	83
Gráfico 11. Perfil de temperatura para 60% Vapor, 0 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.....	83
Gráfico 12. Distribución de temperaturas máximas para el conjunto 2 de ensayos.....	84
Gráfico 13. Perfil de temperatura para 20% Vapor, 0 LPM Aire, 25 –75% Híbrido.....	88
Gráfico 14. Perfil de temperatura para 40% Vapor, 0 LPM Aire, 25 –75% Híbrido.....	88
Gráfico 15. Perfil de temperatura para 60% Vapor, 0 LPM Aire, 25 –75% Híbrido.....	89
Gráfico 16. Distribución de temperaturas máximas para el conjunto 3 de ensayos.....	90
Gráfico 17. Perfil de temperatura para 0% Vapor, $\phi = 0,3$, 50 –50% Híbrido.	94
Gráfico 18. Perfil de temperatura para 20% Vapor, $\phi = 0,3$, 50 –50% Híbrido.	94
Gráfico 19. Perfil de temperatura para 40% Vapor, $\phi = 0,3$, 50 –50% Híbrido.	95
Gráfico 20. Perfil de temperatura para 60% Vapor, $\phi = 0,3$, 50 –50% Híbrido.	95
Gráfico 21. Distribución de temperaturas máximas para el conjunto 4 de ensayos.....	96
Gráfico 22. Resumen de temperaturas máximas de todos los conjuntos experimentales.	100
Gráfico 23. Velocidades del frente de combustión para los conjuntos experimentales.	103
Gráfico 24. Producción de H ₂	103
Gráfico 25. Producción de CO.	104

FIGURAS

Figura 1. Sección transversal de un neumático moderno [8].	22
Figura 2. Diagrama de flujo proceso PGL [13].	30
Figura 3. Reacciones durante gasificación de material carbonoso [16].	31
Figura 4. Balance de masa proceso típico de PGL [13].	34
Figura 5. Entalpía a lo largo de reactor adiabático [23].	42
Figura 6. Esquema de diferentes zonas características en reactor MPI [23].	43
Figura 7. Sistema de instrumentación para XRF [30].	49
Figura 8. Interacción de fotones de rayos – X con materia [32].	50
Figura 9. Arreglo experimental.	52
Figura 10. Reactor MPI y posición de termocuplas.	54
Figura 11. Sistema de captación residuos sólidos.	58
Figura 12. Espectrómetro de rayos – X, UTFSM.	59
Figura 13. Muestras de neumáticos para gasificar.	67
Figura 14. Pellets de NFU.	68
Figura 15. Pellets de NFU cristalizados.	93
Figura 16. Espectro de NFU por XRF.	130
Figura 17. Espectro de aislante térmico por XRF.	131
Figura 18. Espectro de papel filtro por XRF.	131
Figura 19. Espectro característico de papel filtro saturado por XRF.	132
Figura 20. Espectro característico de papel filtro saturado por XRF (UdeC).	133
Figura 21. Espectro de polvo de NFU por XRF.	133
Figura 22. Avance del frente en termocupla No.3.	139
Figura 23. Avance del frente en termocupla No.2.	139
Figura 24. Avance del frente en termocupla No.1.	140

1. INTRODUCCIÓN

Debido al rápido incremento del uso del automóvil en el mundo durante las últimas décadas, la generación de residuos derivados de éste, principalmente los neumáticos fuera de uso (NFU) han alcanzado una tasa de crecimiento alarmante y suponen un problema higiénico, estético, y ambiental sobre todo en su disposición final. Hoy en día la mayoría de los NFU son dispuestos en vertederos o acumulados en pilas de acopio, lo que implica un desperdicio considerable de espacio [3] [10] [11]. Solamente un pequeño porcentaje de estos residuos se utiliza como opción de reutilización o reciclaje, como por ejemplo en el relleno de asfalto para pavimento o tratado como materia prima para diversos productos secundarios [3] [6] [19]. Otro uso alternativo para el NFU, es como recurso energético, ya que está compuesto de materiales en la forma de C_xH_y , posee alto contenido de carbón y material volátil, y su poder calorífico es mayor al del carbón, convirtiéndolo en un buen material para la recuperación energética, siempre y cuando se adopte una tecnología apropiada [11-15] [39]. En Chile, enmarcado en el proyecto de ley sobre la gestión de residuos y la responsabilidad extendida al productor (REP) [3] se pretende dentro de otras metas, la valorización energética de los residuos fuera de uso. En éste sentido, el presente trabajo de investigación pretende ser un aporte y supone un desafío que como futuros profesionales debemos afrontar.

Dentro de los procesos de recuperación energética del NFU se encuentran la incineración y combustión, pirolisis, licuefacción y gasificación. La incineración es la combustión directa, del material triturado o entero de neumáticos y ha sido utilizada principalmente en plantas cementeras para la fabricación del clinker. La pirólisis es la degradación térmica de compuestos orgánicos en ausencia de oxígeno o en condiciones de combustión parcial, para producir residuos carbonosos, líquidos e hidrocarburos gaseosos. La gasificación es un proceso que se asimila a la pirolisis, seguida de altas temperaturas de reacción entre el neumático y agentes gaseosos como el aire, el oxígeno o el vapor para alcanzar altos rendimientos en la producción de gases con bajo peso molecular como el H_2 y el CO [3].

En este trabajo, se usó un reactor de medios porosos inertes (MPI), para estudiar las características de la gasificación y combustión de pellets de NFU, principalmente para la obtención de gases combustibles. Se estudian los perfiles térmicos, las velocidades de propagación del frente de combustión y la generación de residuos sólidos y gaseosos. Posteriormente se realiza un análisis de escalamiento para llevar lo realizado en laboratorio a algún proceso de tipo industrial.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo de título tiene por objetivo lo siguiente:

- Definir el estado del arte de la gasificación de neumáticos fuera de uso.
- Diseñar e implementar un reactor de medio poroso para la combustión y gasificación de neumáticos fuera de uso mediante la inyección de agentes gasificantes.
- Estudiar experimentalmente las temperaturas de reacción, la producción de gas de síntesis y los productos/residuos (líquidos y sólidos) del proceso mediante cromatografía y espectrometría de rayos X.
- Analizar las variables relevantes para el escalamiento y fabricación del equipo reactor.

3. MARCO TEÓRICO

En éste capítulo se desarrolla el marco teórico del trabajo de investigación, en primer lugar se introducen los temas relacionados con el neumático fuera de uso como el parque automotriz y el diagnóstico de residuos a nivel nacional. Además se presentan los procesos térmicos y la valoración energética que se le da a éste desecho mediante recopilación de información a nivel internacional. Se describen los fundamentos teóricos de la combustión en medios porosos inertes y productos importantes de ésta técnica como es el gas de síntesis, por último se explican las técnicas utilizadas para los análisis de los productos de interés para la parte experimental.

3.1 NEUMÁTICOS FUERA DE USO

En las siguientes secciones se describen aspectos importantes sobre los neumáticos fuera de uso, como el parque automotriz y el diagnóstico nacional de éste pasivo ambiental, como las características físicas y propiedades energéticas las que pueden ser valorizadas como recurso energético mediante el uso de distintas tecnologías.

3.1.1 Parque de Vehículos en circulación en Chile

La información estadística presentada a continuación, corresponde a las publicaciones anuales realizadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) año 2012 [1]. Esta información permite establecer la estructura y el tamaño del parque vehicular del país y además puede ser utilizada como base para una aproximación de la cantidad de neumáticos fuera de uso que eventualmente se podría obtener.

La cantidad de vehículos en circulación al año 2012, incluidos los motorizados y no motorizados (aquellos que no pueden movilizarse por sus propios medios, sino que son arrastrados) alcanzó 3.973.913 unidades. De esta cifra el 97,8% corresponde a vehículos motorizados y solo el 2,2% a los no motorizados [2].

En la Tabla 1 se presenta la evolución de la cantidad de vehículos motorizados y no motorizados en circulación en Chile desde 2006 – 2012.

Tabla 1. Parque de vehículos por tipo de transporte, total país [1].

AÑO	Total	Transporte Particular	Transporte Colectivo	Transporte de Carga
2006	2.657.892	2.299.089	168.635	190.168
2007	2.824.570	2.453.028	170.217	201.325
2008	3.020.050	2.636.521	172.611	213.918
2009	3.139.088	2.744.581	174.998	219.509
2010	3.375.523	2.965.062	178.227	232.234
2011	3.654.727	3.225.597	178.817	250.313
2012	3.973.913	3.531.593	176.909	265.411

De acuerdo a las cifras entregadas por el último Censo del año 2012, la población total de Chile es de 16.634.603, lo que daría un índice aproximado de 4,2 habitantes por vehículo.

Considerando el conjunto del parque vehicular en circulación, en el Gráfico 1 se observa que 88,87% correspondió a transporte particular, 4,45% a transporte colectivo y 6,68% a transporte de carga.

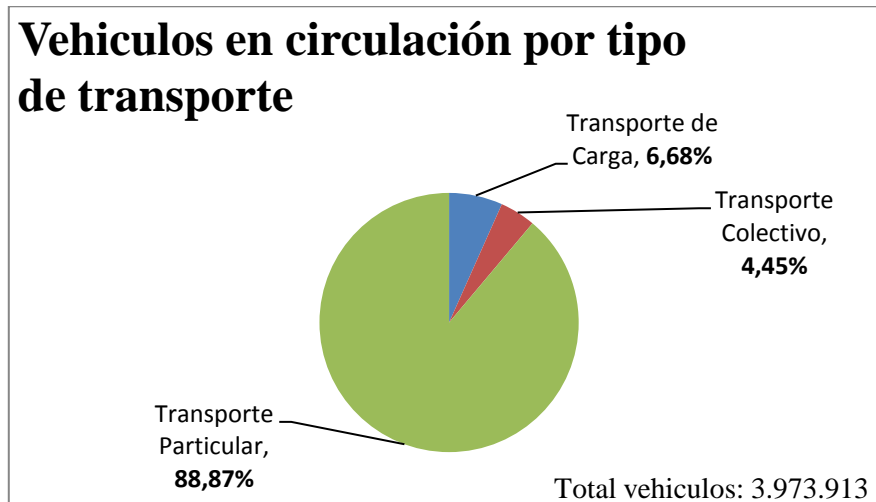


Gráfico 1. Vehículos en circulación, por tipo de transporte (porcentajes 2012) [2].

En el 2012, la Región Metropolitana concentró el 40,81% del parque total vehicular del país, correspondiente a 1.621.946 unidades, le sigue en importancia la Región del Biobío con 10,65% y la Región de Valparaíso con un 9,96%. La distribución del parque de vehículos por regiones se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución de vehículos en circulación por región, 2012 [2]

NOMBRE DE REGIÓN	Vehículos en Circulación
Tarapacá	107.507
Antofagasta	154.255
Atacama	81.741
Coquimbo	161.410
Valparaíso	395.701
Libertador General Bernardo O'Higgins	219.324
del Maule	264.256
Biobío	423.154
La Araucanía	164.926
Los Lagos	163.615
Aysén	32.888
Magallanes y La Antártica	54.141
Metropolitana	1.621.946
de Los Ríos	68.616
Arica y Parinacota	60.433

El mayor crecimiento anual del parque de vehículos para el periodo 2006 – 2011 se da para las regiones del Maule y Coquimbo, registrando un crecimiento anual de 9,7% y 9,2%, respectivamente, las demás regiones a excepción de la Región de Magallanes y La Antártica, mantienen crecimientos por sobre el 5%, tal como se muestra en el Grafico 2.

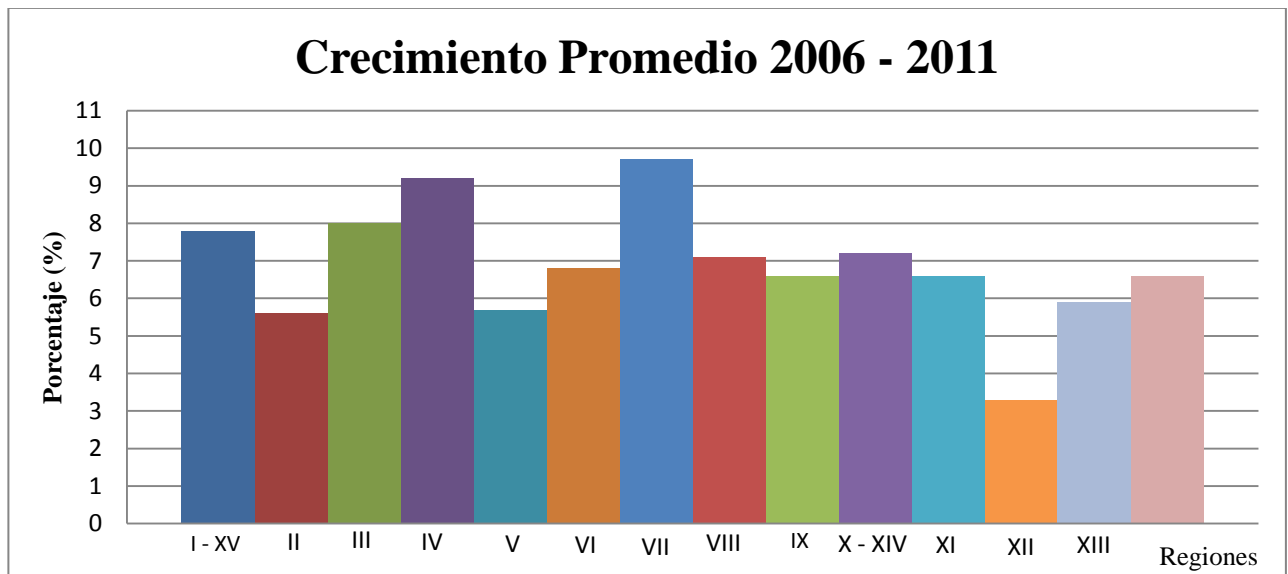


Gráfico 2. Crecimiento promedio anual del parque vehicular (2006 – 2011) [2].

De acuerdo a los antecedentes recopilados, se puede inferir que el crecimiento del parque vehicular es permanente, por lo que la generación de residuos, específicamente, neumáticos fuera de uso, es constante y supone un problema que las autoridades deben tomar en consideración.

3.1.2 Diagnóstico nacional de NFU

Según los datos proporcionados por el estudio de Evaluación de Impactos Económicos, Ambientales y Sociales de la Implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) en Chile [3], realizado por distintos organismos del Estado como el Ministerio de Medio Ambiente (ex CONAMA), el Consejo de Producción Limpia (CPL), en conjunto con la Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G (CINC), compuesta por los cuatro mayores comercializadores de neumáticos en Chile *Goodyear, Bridgestone, Michelin y Pirelli* y con el apoyo técnico de la Agencia de Cooperación Internacional de Alemania (GIZ, ex – GTZ) revelaron que hasta el año 2008 se generaban alrededor de 3 millones de neumáticos fuera de uso, cantidad equivalente a unas 42.000 toneladas de residuo, hacia el año 2010 esta cantidad aumentó hasta unas 46.700 toneladas y en los últimos años ha llegado a 60.000. El diagnóstico sobre la gestión de los neumáticos fuera de uso del año 2008 identificó que 2,5 millones de neumáticos provienen de vehículos livianos, generando 22 mil toneladas de residuo; 85 mil de transporte público, que corresponden a 4 mil toneladas de residuo; 300 mil neumáticos de vehículos de carga, con 14 mil toneladas de residuo; y 3 mil de vehículos agrícolas, cercano a 300 toneladas de residuo. Se proyecta una generación de productos fuera de uso para el año 2015 de 65.795 toneladas y para el año 2020 un total de 80.046 toneladas [3].

Incluyendo solo los neumáticos hasta un tamaño usado en camiones, la distribución geográfica de la generación nacional de NFU es la siguiente [4]:

- Región Metropolitana 40%
- Valparaíso y Libertador Bernardo O'Higgins 10%
- Zona Norte (Hasta la Región de Valparaíso) 14,5%

- Zona Sur (de la Región del Maule hasta la de los Lagos) el 33,5%
- Extremo Sur un 2%

Con respecto al sector minero, según estudios de *Recycla Chile* realizados en el año 2010 se estimó que este sector desecha cerca de 18.000 unidades de neumáticos por año. De éstos aproximadamente el 90% no son reciclados y se desechan de acuerdo al criterio de cada ente generador, ajeno a la responsabilidad del fabricante o importador, situación que ha ido cambiando en forma poco significativa.

Actualmente existe escaso manejo de los residuos, de acuerdo a estudios aproximadamente un 85% de los NFU termina en un destino desconocido, pues tienen poco valor comercial [3], debido a esto existen grandes acopios o bodegajes de NFU en instalaciones municipales e incluso en recintos militares. En Chile no existen lugares autorizados para su disposición final, solo para el acopio como por ejemplo, en la comuna La Pintana en Santiago. Dentro de las actividades relacionadas para la recuperación de estos residuos catalogados como no peligrosos, se tienen:

- Recauchaje de neumáticos de mayor tamaño: Incrementa la vida útil del producto.
- Valorización energética: uso como combustible alternativo en una planta cementera, por ejemplo la planta Cemento Melón ubicada en Calera, Región de Valparaíso, que puede reemplazar hasta un 20% del combustible utilizado mediante NFU (12.450 toneladas/año) [3].
- Uso directo en infraestructura: uso en muros de contención para control de erosión, control de cárcavas (socavones) en la agricultura, delimitaciones y otras construcciones.
- Uso en rellenos sanitarios: como protección de taludes impermeabilizados.

En el marco de la firma del convenio entre la CPL y el CINC, se crea una empresa exclusiva para el reciclaje de neumáticos, enfocada en la trituración y granulación llamada “*Polambiente*” ubicada en Lampa, Santiago. Cuenta con una superficie de 3.500 metros cuadrados para maquinarias, oficinas y sectores de acopio, la

maquinaria fue importada desde Italia y supuso una inversión total de la planta de alrededor de US\$ 5 millones, la cual ha permitido el reciclaje anual de cerca de 1.500.000 neumáticos, permitiéndole al Estado ahorrar cerca de US\$ 2,7 millones en recursos para la gestión de éste residuo [5]. La planta tenía como meta facturar entre 800 a 1.000 millones de pesos anuales en la venta de caucho reciclado para empresas que requirieran de gránulos triturados para la manufactura de distintos productos, sin embargo en Chile no existe un mercado muy amplio para estos, de manera que se hace indispensable potenciar actividades de innovación y desarrollo para impulsar la creación de nuevos usos y potenciar la demanda [6].

3.1.3 Características Físicas del neumático

El mayor porcentaje de material que contiene el neumático es caucho, existen dos grandes grupos de este material: el caucho natural y el caucho artificial. El neumático tiene una estructura compleja al estar formado por cuatro materiales principales que, en su conjunto le confieren las características necesarias a su función y seguridad. Estos cuatro materiales son: caucho artificial o natural que es vulcanizado mediante la adición de azufre y la aplicación de calor, para lograr aumentar la dureza y la resistencia a las bajas temperaturas, negro de carbono que se usa principalmente para reforzar el caucho, es decir, hacerlo más resistente a la abrasión y a la fatiga, disminuir los rasgamientos y aumentar su flexibilidad; sílice; acero y tejido de poliamida o poliéster. La estructura de los neumáticos varía según el tipo y depende del objetivo para el que fueron diseñados, pero todos están constituidos por los componentes que se indican a continuación [7]:

- **Banda de rodamiento**: Es la parte del neumático que permite la adherencia al suelo. Su diseño debe proporcionar capacidad de frenado y tracción. Su compuesto de caucho debe resistir la abrasión y el desgaste.
- **Pared lateral**: Es la parte de la estructura que va de la banda de rodamiento hasta el talón, siendo revestida por un compuesto de caucho con alta resistencia a la fatiga por flexión.

- **Telas:** En la construcción radial, las cuerdas de la tela de carcasa corren de talón a talón en el sentido radial. Son ellas las que tienen la función de soportar la carga. Sobre las telas de la carcasa, en el área de la banda de rodamiento son montadas las telas estabilizadoras. Sus cuerdas corren en sentido diagonal y son las que mantienen la estabilidad del neumático.
- **Talón:** Están compuestos de cables de acero revestidos en cobre para evitar la oxidación, separados individualmente por compuestos de caucho para evitar el contacto entre ellos y revestidos de tejido tratado. Su función es amarrar el neumático a la llanta y tener alta resistencia a la rotura.
- **Innerliner:** Es el revestimiento protector de la estructura en la parte interna del neumático. En el caso de los neumáticos radiales de acero sin cámara, éstas tienen impermeabilidad al aire y a la humedad.

En la Figura 1 se presenta la sección transversal de un neumático común utilizado para automóviles.

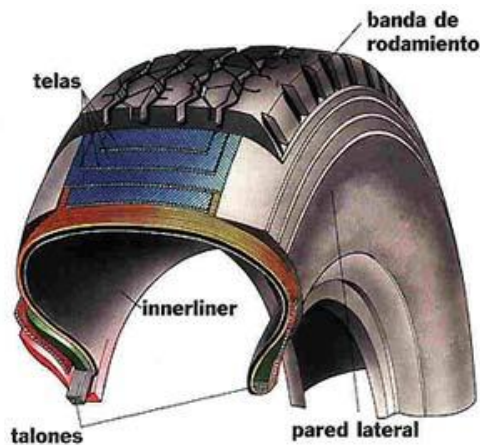


Figura 1. Sección transversal de un neumático moderno [8].

Existen muchas referencias, que indican los porcentajes de cada componente que constituyen un neumático, la Tabla 3 presenta los porcentajes promedios de cada uno de estos.

Tabla 3. Componentes del Neumático, Fuente CINC.

Componentes	Porcentaje
Caucho Natural/Sintético	45 - 60
Negro de carbono	21 - 22
Acero	16 - 25
Textil	5,5
Oxido de Zinc	2
Azufre	1
Otros Aditivos	7

El caucho sintético más utilizado en los neumáticos es el copolímero butadieno-estireno (SBR o BUNA-S), el cual contiene alrededor de un 25% en peso de estireno y el otro 75% en butadieno. Otro caucho sintético que se utiliza en neumáticos es el butilcaucho, empleado para la producción de las cámaras de aire, si bien la tendencia actual es no utilizarlas.

Los neumáticos tienen una forma de identificarse, basta con leer el costado de este para obtener la información sobre su fabricación, las características principales son [9]:

- 1. Marca**
- 2. Ancho del neumático** indicada en [mm].
- 3. Relación de aspecto** relación entre altura y anchura en la sección transversal del neumático, expresada en porcentaje como /XX.
- 4. Estructura** del neumático generalmente con letra R (Radial) que indica que posee una carcasa con lonas de cables en arcos radiales, aunque antiguamente se utilizaban D (Diagonal)
- 5. Diámetro de la llanta** medida en diagonal de borde a borde de la llanta expresada como pulgadas.
- 6. Código de carga**, que indica la carga máxima que puede soportar un neumático cuando está correctamente inflado.

7. **Código de velocidad**, que indica la velocidad máxima a la cual se puede someter el neumático indicada por las letras M,N,P,Q,R,S,T,U,H,V,W,Y,ZR.

Por ejemplo en un neumático puede leerse 165/70 R13 79S, DOT, lo que indica que tiene un ancho de 165 [mm], con una altura que es igual al 70% de la anchura del neumático, una estructura radial, con un diámetro de 13 pulgadas, el índice 79 significa que puede soportar una carga de 437 [kg] y el código S significa que puede someterse a una velocidad máxima de 180 [km/h].

La duración promedio de un neumático común de automóvil está entre 40.000 [km] y 60.000 [km], con máximos de 80.0000 [km] antes de tener que realizar su sustitución.

3.1.4 Propiedades energéticas del neumático

Los neumáticos fuera de uso se han utilizado como recurso energético en Japón, Europa, y los Estados Unidos desde 1970. Una vez que se encuentran en depósitos de acopio, sus usos son limitados, sin embargo son una opción viable a la hora de ser utilizados para generación de energía bajo procesos apropiados de combustión, en distintas aplicaciones como son calderas industriales, hornos de cemento, industria del papel y recuperación combinada de material/energía principalmente bajo gasificación y pirólisis.

En el año 2007, 123 industrias usaron 155 millones de NFU como combustible en Estados Unidos de acuerdo al análisis de mercado realizado por la U.S Rubber Manufacturer's (RMA) [10].

Estos residuos sin refuerzos metálicos tienen un poder calorífico que fluctúa entre los 7.800 a 8.600 [kcal/kg] (32MJ/kg). Las propiedades energéticas de los NFU, pueden compararse con el uso del carbón, que contiene típicamente entre 5.550 a 7200 [kcal/kg], su temperatura de auto-ignición bordea los 400 [°C] la cual debe mantenerse durante varios minutos, a esta temperatura el neumático comienza a fundirse.

Los neumáticos pueden inyectarse enteros en hornos de cemento, sin embargo en otras aplicaciones se requiere que este sea triturado en pequeños pellets, llamados TDF (por sus siglas en inglés, “*Tire-derived fuel*”) en donde si es necesario se remueven los cordones de reforzamiento y los cordones de alambre. Para cualquier tamaño los neumáticos continúan siendo un combustible sólido, por lo tanto, los sistemas que queman TDF deben ser capaces de recibir y realizar la combustión de un combustible sólido.

La composición elemental de los neumáticos y del carbón depende del tipo y la fuente de donde provengan. En la Tabla 4 se presenta un cuadro comparativo entre un TDF característico con un 90% de material de reforzamiento removido, versus un carbón bituminoso utilizado para generación de vapor [11].

Tabla 4. Comparación de las características químicas NFU vs Carbón [11].

CARACTERISTICA	CARBON BITUMINOSO - NORESTE US-	TDF 90%+ Alambre Removido	CARBON SUBITUMINOSO - OESTE US-
Humedad (%)	10,43	0,62	24,68
Poder Calorífico (MJ/kg)	30,35	32,92	26,48
ANALISIS INMEDIATO (% Base Seca)			
Ceniza	16,16	4,81	6,37
Material Volátil	38,14	67,06	44,43
Carbón Fijo	45,7	28,13	49,2
TOTAL	100	100	100
ANALISIS ELEMENTAL (% Base Seca)			
Carbono	65,49	83,79	70,73
Hidrogeno	4,56	7,13	4,85
Nitrógeno	1,11	0,24	0,84
Azufre	4,52	1,84	0,41
Ceniza	16,16	4,81	6,37
Oxigeno (por diferencia)	8,16	2,19	16,8
TOTAL	100	100	100

El análisis inmediato indica las ventajas del TDF con respecto al carbón, por ejemplo, los neumáticos generalmente tienen un porcentaje de humedad menor al del carbón. Como la energía requerida para calentar y vaporizar el agua, generalmente no se

puede recuperar en procesos de conversión de energía, una cantidad de humedad menor, se puede traducir en una mayor eficiencia de combustión. Los TDF son entre 1 a 3% más eficientes que los carbones citados en la Tabla 4 dado el menor contenido de humedad de estos. El menor contenido de cenizas de los TDF (sin alambres) ofrece ventajas similares al del carbón y permite disminuir en costos de operación, además prevalecen cuando se comparan con carbones lignitos con alto contenido de ceniza y menor poder calorífico.

Basándose en el análisis elemental, los neumáticos ofrecen ventajas y desventajas. Cuando se comparan con una gran cantidad de carbones, los TDF tienen menor contenido de azufre, lo que eventualmente representa una ventaja en la disminución de emisiones de óxidos de azufre (SOx), sin embargo existen carbones con menor contenido de azufre, sea cual fuere el caso, los sistemas de tratamiento de TDF deben poseer controles de emisiones para este tipo de óxidos.

La Tabla 5 presenta la energía requerida para fabricar un kilogramo de neumático lo que permite realizar un balance de energía a partir de la valorización energética de los NFU, entendiéndose como una comparación entre la energía requerida para la producción de un neumático y la energía que se puede obtener a partir de su poder calorífico.

Tabla 5. Energía utilizada para fabricar 1kg de neumático [12].

Compuesto	Material usado (kg/kg de producto)	Energía usada (MJ/kg de producto)	Total Energía usada (MJ/kg de producto)
SBR (Estireno-Butadieno)	0,59	55,79	32,92
Negro de Carbono	0,3	126,5	37,95
Acero	0,03	27,8	0,83
Tela	0,08	43,49	3,48
Manufactura		11,7	11,7
Total	1.00 kg		86,88

Típicamente la energía requerida para la fabricación del neumático es [12]:

= 86,88 [MJ/kg] x 10 [kg/neumático] (Peso promedio del neumático) = 868,80 [MJ/neumático].

Usando valores típicos de poder calorífico del neumático, que como se mencionó es de aproximadamente 32[MJ/kg neumático] ó 320 [MJ/neumático] se obtiene el porcentaje de recuperación dado por:

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{320 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{neumático}} \right]}{868,80 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{neumático}} \right]} \times 100 = 36,8\% \text{ (aprox)}$$

3.1.5 Proceso térmicos en NFU.

La Pirolisis, Gasificación y Licuefacción (PGL del inglés, *Pyrolysis, Gasification, Liquefaction*) son tres tecnologías que se relacionan y que pueden, potencialmente, recuperar recursos de gran utilidad como energía, materias primas, metales y fibras a partir de los neumáticos, también ayudaría a disminuir los volúmenes de estos desechos debido a que son difíciles de almacenar y que tienden a emitir gases, albergar roedores y a utilizar grandes espacios. Estas tecnologías ya han sido consideradas y aplicadas para diferentes residuos municipales (MSW, del inglés *Municipal Solid Wast* residuos medicinales, lodos, material proveniente de aguas residuales, entre otros). Los productos obtenidos a partir de estos tratamientos térmicos son [13]:

1. Sólidos (material inerte, metales, escoria, residuos carbonosos, negro de carbono);
2. Líquidos (aceites con fracción de nafta);
3. Gas de Síntesis (hidrógeno y monóxido de carbono);
4. Hidróxidos (lodos).

En las siguientes secciones se describen los principales procesos térmicos a los cuales se puede someter el neumático.

3.1.5.1 Pirólisis

La pirólisis involucra una descomposición térmica de compuestos orgánicos, en sustancias más pequeñas y moléculas menos complejas, bajo un medio limitado de oxígeno. En el caso de neumáticos representa una de las alternativas más atractivas para su reducción.

El proceso de pirólisis puede operar en sistemas de alimentación continuo o de tipo batch, éste último se basa en la inyección de una sola carga de materia prima a la vez, luego de un cierto tiempo de residencia en el reactor térmico tipo batch, los productos y residuos sólidos son removidos, por el contrario, en los sistemas continuos, la materia prima es transportada a través del reactor a una tasa uniforme, a la vez que los productos y residuos sólidos son descargados.

La pirólisis depende de la adición de calor para romper los enlaces químicos, proveyendo un mecanismo en donde los compuestos orgánicos se descomponen y se vaporizan, la mayoría de los proyectos operan con temperaturas entre los 250 – 500 [°C], aunque se han reportado algunos que operan a 900[°C]. A temperatura por sobre los 250[°C], los neumáticos triturados comienzan a aumentar la cantidad de aceites y gases producidos, y por sobre los 400[°C] dependiendo del proceso empleado, el rendimiento en sólidos carbonosos derivados del neumático y aceites podrían disminuir debido a la mayor producción de gases [13].

El típico proceso comercial de pirólisis puede resumirse de la siguiente manera [13] [14]:

1. Los neumáticos como materia prima son pesados y luego pueden introducirse a los sistemas ya sea enteros, cortados a la mitad, rallados o triturados, se utilizan separadores magnéticos para remover materiales ferrosos.
2. La materia prima es secada y precalentada, usando gases derivados del mismo proceso. El oxígeno es purgado por medio de una combinación entre el gas del precalentador de pirolisis y el sistema de inyección de gas inerte (generalmente se usa Nitrógeno).

3. Como variables claves de operación se deben manejar los tiempos de residencia y temperatura en el reactor. Se debe mantener una presión positiva para asegurar que no existan fugas e introducción de oxígeno.
4. La fase líquida, derivada del neumático es condensada y enfriada. Las fracciones pesadas y livianas pueden ser manejadas separadamente. Un separador remueve cualquier remanente de vapor de agua y el producto es filtrado.
5. La fase sólida es enfriada, su tamaño puede ser disminuido, y se filtra. Un separador magnético remueve los metales que quedan del residuo carbonoso, el cual puede tratarse para producir negro de carbono.
6. El gas obtenido del proceso mantiene la presión de operación del sistema y se utiliza para proveer de calor a éste.
7. Los materiales ferrosos triturados se pueden vender como residuos al igual que las fibras separadas, sin embargo, en la mayoría de los casos ésta es eliminada en vertederos.

Las etapas indicadas anteriormente no varían mayormente entre empresas, las variaciones ocurren respecto al tratamiento del material, temperaturas y control de presión. Un diagrama de flujo típico de procesos PGL se indica en la Figura 2.

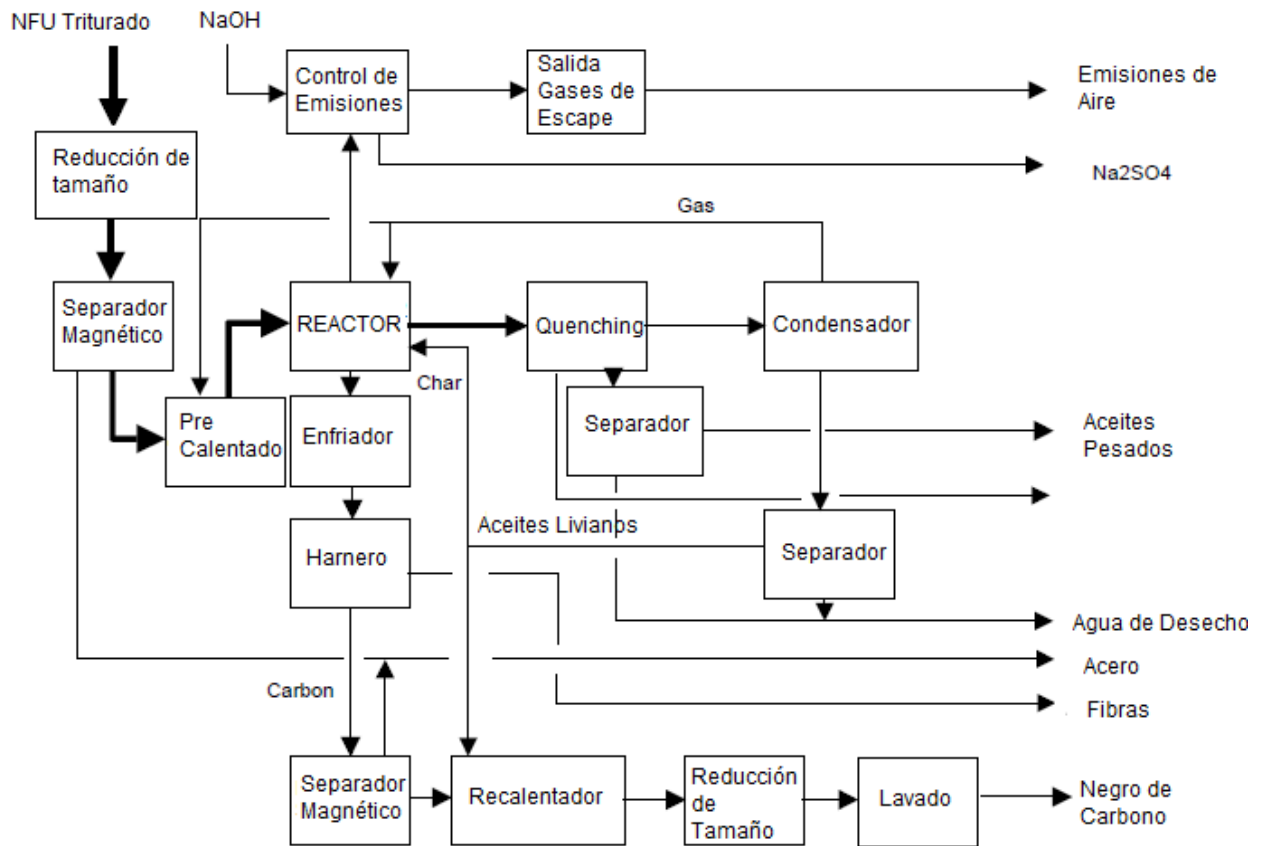


Figura 2. Diagrama de flujo proceso PGL [13].

3.1.5.2 Gasificación

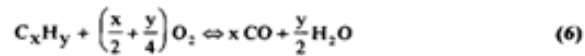
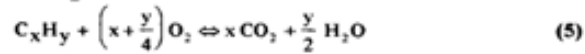
La gasificación, es un proceso de oxidación parcial, ocurre cuando se opera en condiciones entre la completa ausencia de oxígeno y la relación estequiométrica, ésta involucra: el secado de la materia prima, la pirolisis de ésta, y la oxidación del residuo sólido para calentar la reacción y proveer CO al gas. La diferencia entre pirolisis y gasificación se puede establecer en sus objetivos: mientras que la pirolisis pretende principalmente la obtención de un sólido carbonoso y a veces líquidos, en el caso de la gasificación se busca un alto rendimiento en gases, fundamentalmente CO y H₂. Esta diferencia de objetivos determina las condiciones de operación, ya que la gasificación se lleva a cabo a temperaturas superiores y en presencia de agentes gasificantes como el aire, oxígeno, CO₂ o vapor de agua para aumentar la producción de H₂ y CO [15].

Las reacciones básicas que toman lugar durante la gasificación de materiales carbonosos en presencia de oxígeno, y/o vapor de agua se muestran en la Figura 3:

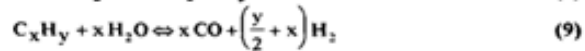
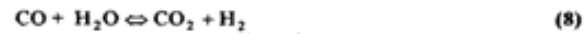
• Raw material decomposition



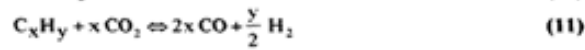
• Reactions with oxygen



• Reactions with water



• Reactions with CO₂



• Methanation reactions

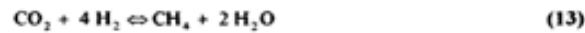


Figura 3. Reacciones durante gasificación de material carbonoso [16].

En muchos casos, antes de la reacción que involucra oxígeno o vapor, la materia prima sufre una descomposición térmica que puede ser expresada de forma esquemática a través de la reacción (1), produciendo carbono e hidrógeno. La conversión a partir de oxidación parcial o total, reacciones (2) a (6) ocurren por medio de transformaciones exotérmicas. Debido a que la gasificación toma lugar en un ambiente limitado de oxígeno, las reacciones de oxidación parcial son las que predominan. En caso contrario, aquellas reacciones que involucran la participación de vapor son endotérmicas, reacción (7) a (9), y son mayormente responsables de la

formación de hidrógeno. La reacción (8) es usualmente conocida como reacción de desplazamiento de agua-gas, pues permite el control de la razón H_2/CO [16]. Otra transformación endotérmica importante son aquellas que involucran CO_2 (reacción (10) y (11)). La reacción (10) es conocida como Reacción de Boudouard, empleada para gasificar el carbón con CO_2 para aumentar la producción de CO . Finalmente se presentan algunas reacciones (12) y (13) de metanización por medio de hidrogenación de CO y CO_2 , las cuales pueden conducir a un descenso considerable de la concentración de H_2 en el gas de síntesis final. La energía total requerida para la gasificación puede ser balanceada por medio de la combinación de reacciones exotérmicas y endotérmicas, principalmente con el control de la razón de O_2/H_2O en el medio de reacción.

La mayoría de los procesos son reacciones de equilibrio, que son establecidas en el gasificador cuando se trabaja a temperaturas entre 1300 y 1500 [°C]. Bajo los 900 [°C], el equilibrio puede ser alcanzado solamente cuando se opera en presencia de catalizadores o con mayores tiempos de residencia. Como resultados, se obtiene una mezcla final de gas compuesta de H_2 , CO , CO_2 , H_2O y algunas cantidades menores de compuestos como CH_4 . La composición exacta del gas de síntesis depende de varios factores, alguno de ellos son la temperatura de reacción y la razón O_2/H_2O . De acuerdo al equilibrio termodinámico, un aumento en la temperatura causa una reducción en la concentración de H_2 y CO_2 , en cambio la formación de CO es mejorada. La razón CO/H_2 puede ser controlada por medio del tipo y la concentración de los agentes gasificantes y puede ser balanceada por medio de la reacción de desplazamiento agua-gas. En adición del gas de síntesis se obtienen residuos que contienen elementos inorgánicos que no han sido gasificados [16].

3.1.5.3 Licuefacción

La licuefacción es la conversión termoquímica de un sólido orgánico a un líquido con propiedades parecidas al petróleo, el cual está conformado de compuestos moleculares pesados similares a los combustibles derivados de éste, a partir de una corriente de gas de pirolisis. En esencia la licuefacción es la manipulación del

proceso de pirólisis con el objetivo de producir líquidos con características similares a los obtenidos del petróleo, como por ejemplo Fuel Oils.

3.1.5.4 Condiciones de operación

Como se mencionó anteriormente, la temperatura del reactor es la variable clave de la performance de los reactores, la mayoría de los procesos de pirólisis poseen un exceso de energía, en donde el gas obtenido del NFU permite mantener activa la reacción, razón por la cual sólo se utiliza propano o gas natural para precalentamientos o puestas en marcha. De acuerdo a [13] para el tratamiento térmico de los neumáticos se requieren aproximadamente entre 12,8 – 117,6 [kWh] por tonelada de materia prima y para mantener la reacción de pirólisis, una energía de entre 1465,38 – 2384,15 [kJ] por kilogramo de neumático. El Gráfico 3 muestra como la temperatura determina la producción de sólidos, líquidos y gases.

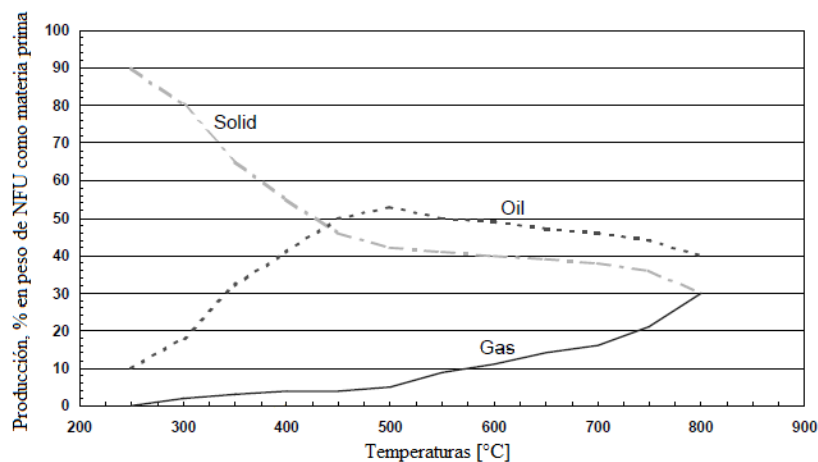


Gráfico 3. Productos derivados de la PGL de NFU [13].

Se observa que para temperaturas entre el rango de 250 – 500 [°C] la producción de gas va de 0 a 6 %, y la fracción de sólidos – líquidos varia inversamente. También se observa que entre 400 a 600 [°C] la producción de sólidos se mantiene estable, finalmente para temperaturas mayores a 800[°C] se presume que la producción de gases aumenta por sobre los 30% disminuyendo la producción de líquidos y sólidos.

3.1.5.5 Productos Obtenidos

En la Figura 4 se presenta un balance de material típico para la pirólisis (P), gasificación (G) y licuefacción (L) de NFU, basadas en una tasa de alimentación de 100 TPD (toneladas por día) para una operación en estado estable por lo cual ésta información puede variar entre uno y otro proyecto o experiencia, sin embargo provee una aproximación para lo que se puede esperar que sean los flujos de material para cualquier proceso de PGL, de acuerdo a la información entregada por [13].

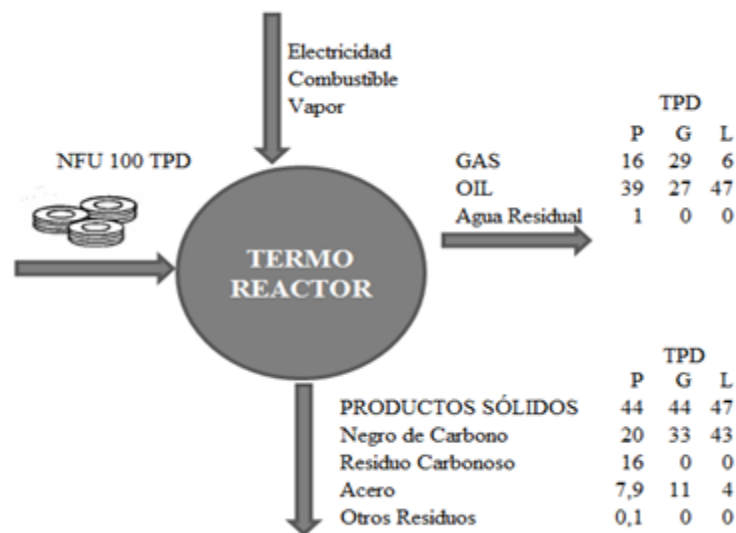


Figura 4. Balance de masa proceso típico de PGL [13].

Los aceites obtenidos a partir de estos procesos reportados son: tolueno, xileno, estireno, benceno, fracciones de nafta, entre otros. Los residuos sólidos a partir del neumático y el negro de carbono pueden ser procesados para mejorar características específicas y cumplir especificaciones requeridas, o pueden ser comercializados directamente. Dentro de los materiales que se detectan de las cenizas producto de la combustión de los residuos carbonosos del neumático, se mencionan compuestos como el óxido de zinc, silicio, magnesio, titanio, calcio, hierro, potasio, también registrándose trazas de cadmio, cromo, vanadio, plomo, entre otros [13] [41]. A pesar que la recuperación de estas sustancias puede ser atractiva, sus concentraciones son

pequeñas. En relación a los gases se han reportado hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, etano, propano, butano entre otros.

3.1.6 Negro de Carbón

El negro de carbón (CB del inglés *Carbon black*) es un material obtenido en la combustión incompleta o la descomposición térmica de hidrocarburos. Es esencialmente un sólido (polvo, gránulos o pasta) negro e inodoro [17] de carbono elemental con una relación superficie-volumen extremadamente alta. Se usa como refuerzo para neumáticos y en otros productos de caucho resistentes principalmente a la abrasión, y como pigmento para pinturas y tintas.

El negro de carbón comúnmente se confunde con hollín o el negro de humo, términos que son comunes por ser residuos carbonosos resultantes de una combustión incompleta de materiales con alto contenido de carbono como aceites, fuel oils, gasolina, carbón, goma, plástico o materiales de desecho. El hollín y el negro de humo contienen grandes cantidades de diclorometano y tolueno que se puede extraer y pueden exhibir un contenido de cenizas por sobre el 50%.

Hasta el 2004, la producción mundial fue de cerca de 8,1 millones de toneladas. Aproximadamente el 90% del negro de carbón se utiliza en aplicaciones relacionadas con la industria del caucho, el 9% como pigmento, y el 1% restante como ingrediente esencial para una gran cantidad de aplicaciones [18].

Es un conocido carcinógeno, daña el tracto respiratorio si se inhala, debido a su alto contenido en hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP).

A continuación se presenta una ficha de información sobre el negro de carbón.

- Número CAS : 1333-86-4
- Fórmula Molecular : C
- Masa Atómica : 12,0
- Temperatura de Auto ignición : En torno a 500°C

- Punto de fusión : 3550 °C
- Densidad relativa (agua = 1) : 1,8 – 2,1

El negro de carbono puede ser utilizado también como combustible alternativo para hornos, o puede ser incinerado (bajo tiempos de residencia adecuados y con contenidos de oxígeno necesarios que permitan que ocurra combustión completa), como tiene un poder calorífico similar al del carbón pulverizado, se quemará completamente con bajas emisiones y virtualmente ninguna ceniza residual, ambos son métodos válidos de eliminación de este residuo [18].

3.1.6.1 Negro de Carbón y Neumáticos.

Existen diversos trabajos de investigación en la obtención de negro de carbón a partir de neumáticos fuera de uso. Uno de estos trabajos [19], se enfoca en obtener negro de carbono pirolizado (PCB *Pyrolyzed Carbon Black*) de los neumáticos, para ser utilizado como agente reforzante en mezclas asfálticas, debido a que aumenta la resistencia al ahuellamiento y la duración del asfalto. Al obtenerse negro de carbono a partir de la pirolisis de NFU y al ser una materia prima de muy bajo costo, supone un remedio para el problema de la eliminación masiva de este material.

La obtención del PCB se puede resumir de la siguiente manera [19]:

- **Recolección y Manejo:** además se inspeccionan y solo se aceptan los NFU ligeros.
- **Área de Producción:** se utilizan correas transportadoras, se limpian y cortan alrededor de 6", luego se envían a la maquinaria principal para el siguiente proceso.
- **Pirólisis:** los paquetes de NFU se pirolizan a 426[°C] aproximadamente, como resultado los sólidos, como el negro de carbón y el acero se depositan en la parte inferior del reactor.
- **Procesamiento del sólido:** el negro de carbón y el acero son movidos a través de una tabla enfriada por agua para empezar el proceso de enfriamiento. El

negro de carbón mejorado es enviado a una pulverizadora húmeda, y es molido para reducir el tamaño de partícula.

- **Procesamiento final de los vapores y líquidos:** se separan los volátiles y no volátiles, se recupera el aceite a través de procesos de destilación, se destila los vapores condensables.

3.1.6.2 Consideraciones Medio Ambientales

El negro de carbono, con excepción del tratado químicamente y aquellos que pueden dispersarse en agua, es comúnmente enterrado en vertederos debido a que no es tóxico y no filtra ningún constituyente a la tierra, al tener una gran área superficial y poseer una fuerte capacidad de adsorción, el material orgánico que se ponga en contacto con él será adsorbido y no podrá ser liberado fácilmente, el negro de carbón no es biodegradable.

Antes se debe estar capacitado en el almacenamiento y manipulación apropiada de esta sustancia química, se debe considerar que si contiene más de 0,1% de HAP, su uso, manipulación y almacenamiento debe restringirse a un área regulada de la misma manera que un carcinógeno.

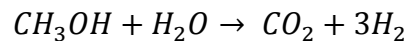
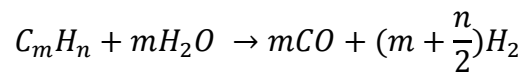
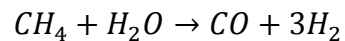
3.2 GAS DE SINTESIS

El gas de síntesis o “syngas” (del inglés *Synthesis gas*) es una mezcla gaseosa compuesta principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno, también puede contener en menores cantidades dióxido de carbono y nitrógeno, éste último se utiliza para la síntesis de amoníaco [21]. Es un compuesto clave para algunos procesos químicos industriales, por ejemplo para la producción de petróleo sintético, en su uso como combustible o lubricante a través de la síntesis de Fischer-Tropsch y en procesos para obtención de gasolina a partir de metanol. Como se observa, posee un amplio rango de aplicación como producto intermediario, además puede ser utilizado como fuente de hidrógeno y monóxido de carbono puro.

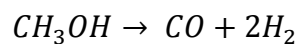
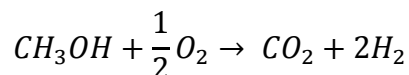
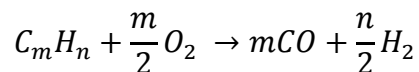
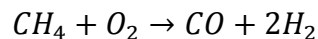
3.2.1 Métodos de obtención de gas de síntesis.

El gas de síntesis puede ser obtenido a partir de sustancias ricas en carbono sometidas a procesos químicos y termodinámicos específicos, algunos ejemplos son el reformado con vapor, oxidación parcial, reformación auto-térmica entre otros. Cuando se tiene materias primas sólidas como carbón, coque, o biomásas, existen varios procesos endotérmicos de gasificación y reacciones exotérmicas de oxidación que proveen calor necesario para mantener los procesos de reacción. A continuación se presentan diferentes procesos que involucran cuatro combustibles representativos: gas natural y gas propano licuado para aplicaciones estacionaras, combustibles en base a hidrocarburos (C_mH_n) y metanol (MeOH) para aplicaciones móviles, y gasificación de carbón para aplicaciones industriales a gran escala, la mayoría de las reacciones requieren o pueden ser promovidas mediante agentes catalizadores o bajo ciertas condiciones [22].

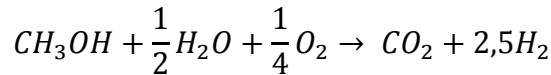
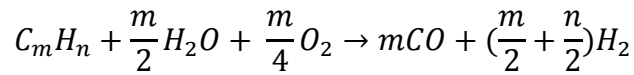
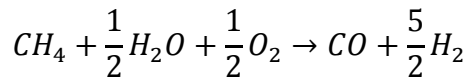
Reformado con vapor



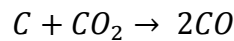
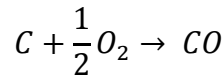
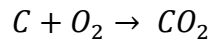
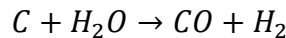
Oxidación parcial



Reformado auto-térmico



Gasificación de carbón



Los procesos de reformado y gasificación producen syngas cuyas tasas de H₂ y CO dependen de la materia prima y las condiciones del proceso tales como la alimentación de vapor o la tasa de carbono, temperaturas y presión de reacción.

3.3 COMBUSTIÓN EN MEDIOS POROSOS INERTES

La combustión es una reacción química de oxidación, en la cual se desprende energía en forma de calor que puede ser utilizado para distintos propósitos. En la actualidad un área muy nueva y emergente relacionada a éste campo es la combustión en medios porosos, que a diferencia de los procesos de combustión convencional con usos de premezclas, la tecnología con quemadores de medios porosos no opera con una llama libre sino que ésta se forma a partir de micro-llamas de tamaño de un poro que son capaces de propagarse a lo largo de la matriz porosa. Cuando las reacciones exotérmicas liberan suficiente energía, es posible mantener reacciones químicas continuamente en el medio poroso. Dependiendo de la naturaleza física y química del material poroso, éste tipo de combustión puede ser clasificada en tres tipos: (a) inerte (el medio permanece químicamente inerte frente a las reacciones químicas, por lo

tanto, pueden operar con una gran variedad de materias primas), (b) catalítica (existe participación de la matriz porosa lo que facilita la formación de compuestos y procesos) y (c) combustible (también participa la matriz porosa y aporta como reactante a la combustión). El tipo de combustión utilizada en éste trabajo se basa en el tipo combustión de medio poroso inerte (MPI).

En la combustión de medios porosos inertes ocurre una interacción heterogénea entre dos medios diferentes, usualmente un medio sólido y uno gaseoso, en la práctica se utilizan dos grandes sistemas de propagación de la llama, uno estacionario y uno transiente. El primero es ampliamente usado en quemadores radiativos debido a la alta emisividad del sólido, aquí la zona de combustión es estabilizada mediante un elemento poroso, imponiendo condiciones de borde y limitando la propagación de la llama. El segundo sistema (transiente) se basa en el exceso de entalpía y es el que se usa para el trabajo de esta investigación, aquí la zona de reacción posee la libertad de mover libremente la llama aguas arriba (en la dirección contraria a la premezcla utilizada) o aguas abajo (misma dirección al sentido del flujo de los reactantes), éste tipo de combustión en un medio poroso inerte es también conocido como combustión de filtración.

De acuerdo a [23] existen cuatro formas de combustión posibles en medios porosos inertes: (1) la combustión se lleva a cabo libremente sobre la superficie del medio poroso donde se encuentra la formación de múltiples llamas; (2) la combustión se realiza justo debajo de la superficie en donde la llama queda “anclada” a ésta, con presencia de reacciones químicas entre los poros. Estas reacciones ocurren parcialmente al interior de los poros del medio inerte, al alcanzar la temperatura de ignición de la mezcla; (3) la combustión es producida completamente al interior del medio poroso inerte, en una condición estable. Cuando la velocidad del flujo de mezcla es igual al de la velocidad del frente de llama; la zona de combustión se encuentra en un estado estacionario al interior del reactor; (4) al igual que la anterior, la combustión es producida completamente al interior del medio poroso inerte. Sin embargo, la combustión presenta una condición inestable, cuando la velocidad del

frente de llama es superior o inferior a la velocidad del flujo de la mezcla; produciendo el desplazamiento de la zona de reacción al interior del reactor.

La combustión de una mezcla de gas entre los vacíos de un medio poroso tiene características diferentes a otros sistemas observados (sistemas de llama libre por ejemplo), esto se debe a las grandes diferencias existentes en las propiedades termo-físicas de la fase sólida y gaseosa lo que permite una mejora en la transferencia de calor por conducción en la matriz sólida. Por otra parte el amplio rango que existe para el intercambio de calor por radiación entre elementos superficiales de la fase sólida y su gran área superficial por unidad de volumen contribuye a una transferencia de calor eficiente entre ambas fases. La energía liberada durante las reacciones químicas está íntimamente relacionada con la transferencia de calor, también con el transporte de energía por advección, los límites de inflamabilidad y los rangos de estabilidad diferentes a los encontrados en diseños convencionales.

La propagación de la llama en medios porosos inertes depende de la estructura y las propiedades físicas de la matriz sólida y de las propiedades del gas combustible. Las modalidades de propagación de la llama pueden ser clasificadas en distintos regímenes, los cuales se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Regímenes de propagación de la llama en MPI [24].

Régimen	Velocidad de la llama [m/s]	Mecanismo de propagación de la llama
Baja Velocidad	$0 - 10^{-4}$	Conducción de calor y transferencia de calor entrefases.
Alta Velocidad	0,1 – 10	Alta convección
Combustión Rápida	10 – 100	Convección, gradiente de presión bajo
Velocidad del Sonido	100 – 300	Convección con gradiente de presión significativo.

Detonación a baja velocidad	500 – 1000	Autoignición con onda de choque
Detonación Normal	1500 - 2000	Detonación con pérdidas de momentum y calor.

La combustión en MPI puede ser caracterizada como un sistema de recirculación de calor en el cual los reactantes o solo el aire de combustión son precalentados usando el calor que se encuentra en las zonas de alta temperatura. Está comprobado mediante distintos trabajos que la recirculación de calor mejora la estabilidad de la llama y extiende el rango de los límites de inflamabilidad [25][26]. El concepto de la recirculación de calor es ilustrado en la Figura 5 para un sistema de combustión adiabático [23].

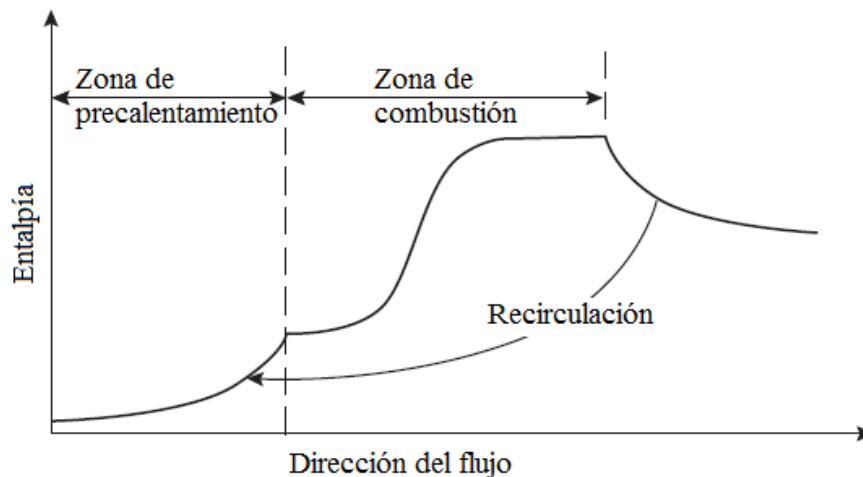


Figura 5. Entalpía a lo largo de reactor adiabático [23].

En la Figura 5 se observa que existe una zona de precalentamiento, en la cual el sólido traspa energía a la fase gaseosa para su precalentamiento gracias a la transferencia de calor por convección, conducción y radiación desde la zona de combustión lo que origina un aumento gradual en la entalpía. En la zona de combustión ocurren las reacciones exotérmicas donde el medio sólido alcanza su máxima temperatura, y el calor de éste permite el aumento de temperatura de la premezcla previa a su combustión. La transferencia de calor se realiza en todas las

direcciones (razón por la cual se debe contar con un buen aislante para reducir pérdidas de calor). Luego siguiendo la dirección del flujo, se ubica la tercera zona en donde se presenta la salida de los gases resultantes producto de la combustión, los cuales permiten calentar el medio sólido que se encuentra en zonas interiores del reactor.

La Figura 6 muestra una representación de un quemador de medio poroso que utiliza premezclas gaseosas con una región para el precalentamiento, lo que permite observar físicamente cómo es el proceso de recirculación de calor dentro del reactor.

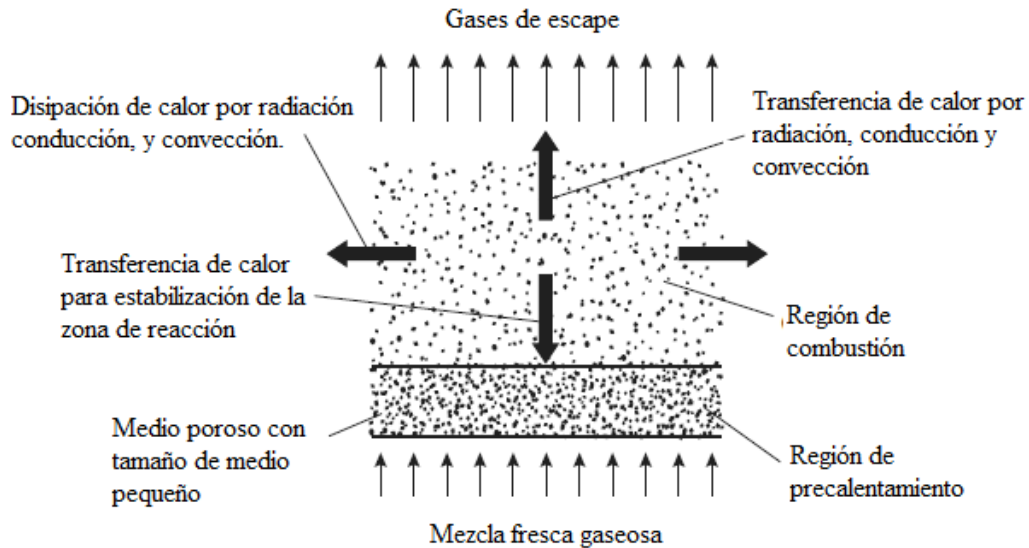


Figura 6. Esquema de diferentes zonas características en reactor MPI [23].

3.3.1 Exceso de entalpía

La idea del exceso de entalpía se fundamenta en que la temperatura de combustión en un sistema puede ser superior a la temperatura adiabática teórica si los productos de la combustión precalentaban a los reactantes. La cantidad de energía generada por la combustión y que circula por el proceso de combustión está dada por [23] [25] [26].

$$\int_{T_0}^{T_f} C_p dT = Q_C + Q_a = H_f - H_0$$

Donde, T_f es la temperatura final, T_0 es la temperatura inicial, Q_c es el calor liberado por la conversión de energía química, Q_a es la energía adherida, H_f y H_a son las entalpías en ambos estados. La parte circulante de energía térmica de los productos generados aumentará la temperatura de la combustión, por lo tanto, la entalpía de la zona de reacción será superior a la convencional, esto resulta en el término “Combustión con exceso de entalpía”, también algunos autores utilizan el término como combustión súper-adiabática” como sinónimo para el exceso de entalpía, aunque no se considera apropiado [25][26].

3.3.2 Aplicaciones de la tecnología de MPI.

Los reactores de medios porosos han sido diseñados para quemar combustibles sólidos y gaseosos. Sin embargo, recientes estudios y desarrollos se han centrado en reactores que queman combustibles gaseosos como flujos de premezcla (aire y combustible) [23]. Los reactores de medios porosos que utilizan premezclas son una tecnología que permite una gran cantidad de aplicaciones permitiendo una emisión reducida de contaminantes y la capacidad de quemar combustibles con bajo poder calorífico [23]. Esencialmente, existen tres tipos de desarrollos que utilizan los medios porosos inertes para sostener los procesos de combustión: (1) Cámaras de combustión (quemadores), el cual es un dispositivo que convierte la energía química del combustible en energía térmica con pérdidas de calor mínimas, algunos ejemplos son quemadores para la destrucción de compuestos orgánicos volátiles (COV), incineración de hidrocarburos halogenados (aquellos en que se sustituye un hidrógeno por algún elemento del grupo 17 de la Tabla Periódica, flúor, cloro, bromo, yodo y ástato); (2) Calentadores radiantes que permiten convertir la energía química del combustible en una corriente de productos con gran entalpía y eventualmente en radiación dirigida a algún objetivo, estos sistemas son usados ampliamente en la industria manufacturera y procesamiento de materiales [23] [25] [26]; (3) Calentadores con cámaras de combustión, a los cuales se les integra un intercambiador de calor de manera que es posible aprovechar la energía química del

combustible en energía térmica de algún fluido de trabajo que circula a través del intercambiador, de esta forma puede utilizarse en generación de vapor, gasificadores, etc. En resumen las aplicaciones que utilizan este tipo de tecnología son [25]:

1. Motores de combustión interna.
2. Turbinas de gas y propulsión.
3. Intercambiadores de calor.
4. Recuperación de gases y aceites.
5. Iluminación.
6. Producción de hidrógeno.
7. Conversión termo eléctrica y cogeneración.
8. Combustión de combustibles de bajo poder calorífico.
9. Combustión de combustibles sólidos o polvos.
10. Síntesis de cloruro de hidrógeno.
11. Oxidación de compuestos orgánicos volátiles.
12. Combustión de combustibles líquidos.

Alguna de las ventajas que se pueden nombrar de esta tecnología son [23] [26] [27]:

1. Baja emisión de contaminantes como NO_x, debido a un eficiente control de las temperaturas del frente de combustión.
2. Estabilidad para la combustión debido a la gran capacidad térmica del reactor, lo que permite trabajar con un amplio rango de mezclas.
3. La alta capacidad calórica del medio poroso inerte mejora la estabilidad en la combustión frente a cambios en las tasas de exceso de aire.
4. La excelente capacidad para la transferencia de calor del medio permite altas velocidades de combustión.

3.4 CROMATOGRAFÍA GASEOSA

La cromatografía es un método de separación para la caracterización de mezclas complejas, se basa en el principio de retención selectiva, cuyo objetivo es separar los distintos componentes de una mezcla que se les suele llamar analitos. El analito es el

componente (elemento, compuesto o ión) de interés analítico de una muestra. Son especies químicas cuya concentración se desea conocer, por tanto, es una especie química que puede ser identificada y cuantificada.

En específico, en la cromatografía de gases la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica. La extracción se produce por el flujo de una fase móvil de gas inerte, llamado gas carrier que puede ser Ar, N, H₂ o He.

El principio de funcionamiento de la cromatografía gaseosa es el siguiente: Un gas inerte fluye en forma continua desde un cilindro de gas a través del inyector, la columna y el detector. La velocidad de flujo del gas carrier se controla para asegurar tiempos de retención reproducibles (se llama tiempo de retención al intervalo que transcurre después de la inyección de la muestra para que el peak del analito alcance el detector). La muestra se inyecta mediante una jeringa en el inyector que se encuentra a alta temperatura, donde se vaporiza y es transportado por una columna que poseen longitudes de entre 5 a 15 metros que están cubiertas por un líquido o sólido, llamadas fases estacionarias de alto punto de ebullición. La muestra se reparte entre la fase móvil y la estacionaria de modo de que los componentes individuales se separen en base a su solubilidad. Luego de la columna, el gas carrier y la muestra pasan a través de un detector (FID, TCD, etc) donde se mide la cantidad de cada componente para luego generarse un cromatograma [28] [29].

Los detectores usados para cromatografía de gases pueden dividirse de forma genérica en detectores universales y detectores específicos, los primeros ofrecen la ventaja de responder prácticamente ante cualquier compuesto que pueda eluir de la columna.

En el laboratorio se trabajó con un Detector de Conductividad Térmica (TCD) equipado en el cromatógrafo de gases, el TCD responde a la diferencia de conductividad térmica existente entre el gas portador puro y el gas portador mezclado con otra sustancia, donde la magnitud de la respuesta dependerá de la diferencia de conductividad térmica entre el compuesto que eluye de la columna y el gas portador.

En un TCD, el gas procedente de la columna pasa a través de una cavidad termostatazada que contiene el elemento sensor. Cuando pasa a través del detector, la pérdida de calor del sensor es función de la diferencia de temperatura entre éste y la pared de la cavidad y de la conductividad térmica del gas portador; cuando eluye una sustancia mezclada con el gas portador, la conductividad térmica varía y como consecuencia se produce un cambio de temperatura en el sensor que se traduce en una variación de una señal abierta (resistencia o voltaje, según elemento sensor) que es amplificada y registrada [28].

El análisis cuantitativo permite determinar la concentración de los componentes analizados, para la cromatografía de columna, el análisis se basa en la comparación de la altura o del área del pico del analito con la de un gas patrón inyectado bajo las mismas condiciones cromatográficas [28] [29].

3.5 ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS - X

La Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF por *X-Ray Fluorescence*) es una técnica que consiste en obtener análisis químicos cualitativos o cuantitativos de manera rápida, permitiendo conocer la composición elemental de materiales, se basa en la emisión y detección de Rayos X “secundarios” (o fluorescentes) característicos de materiales cuando han sido excitados por el bombardeo de Rayos X de alta energía o rayos gamma. El objetivo del análisis cualitativo es encontrar los elementos que están presentes en una muestra mediante la identificación de peaks a energías específicas en el espectro de Rayos X usando información a partir de valores tabulados, gráficos o en base de datos computacionales. Para el análisis cuantitativo existen numerosos métodos, empíricos y teóricos los cuales involucran una gran cantidad de métodos numéricos y el uso de patrones, sin embargo existe una primera aproximación al análisis cualitativo asumiendo que la intensidad relativa de una línea de Rayos X es aproximadamente proporcional a la concentración másica del elemento. Esta relación se da por el hecho de que la masa de la muestra penetrada por electrones incidentes es aproximadamente constante independiente de su composición

(los electrones son desacelerados por la interacción con los electrones de los niveles superiores del átomo y el número de estos electrones por átomo es igual al número atómico, que es aproximadamente proporcional a la masa atómica) [30].

Dado que éste método es rápido y no destructivo, es el elegido para aplicaciones en terreno o para el control de materiales en producción industrial. Dependiendo de la aplicación la espectrometría XRF puede ser realizada utilizando no solo Rayos X, sino que otra fuente primaria de excitación como partículas alfa, protones o corrientes de electrones con alta energía.

El principio de funcionamiento de la espectrometría XRF es el siguiente: Cuando una fuente de excitación de rayos X primarios a partir de un tubo de Rayos X o una fuente radiactiva golpea a una muestra, el Rayo puede ser absorbido por el átomo o dispersado a través del material. El proceso en el cual un Rayo X es absorbido por un átomo mediante la transferencia de toda su energía a un electrón mas interno se llama “efecto fotoeléctrico”. Durante este proceso si el Rayo X primario tiene la suficiente energía, los electrones son expulsados de las capas internas; creando puestos vacantes. Estas vacantes presentan una condición inestable del átomo. A medida que el átomo vuelve a su condición estable, los electrones de las capas externas son transferidos a las capas internas, durante éste proceso se emite un Rayo X característico, cuya energía es la diferencia entre las dos energías de enlace correspondiente a cada capa. Debido a que cada elemento tiene un conjunto único de los niveles de energía, cada elemento produce un Rayo X en un conjunto único, permitiendo una medición de la composición elemental de una muestra de forma no destructiva. El proceso de emisión de un Rayo X característico es llamado “*Fluorescencia de Rayos X*”. El análisis usando la fluorescencia de rayos X es llamado “*Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X*”, en la mayoría de los casos las capas más internas K y L están envueltas en la detección por XRF. Un espectro típico de Rayos X de una muestra irradiada mostrará múltiples peaks de diferentes intensidades, las cuales son detectadas [30]. En la Figura 7 se muestra una fotografía del sistema utilizado.

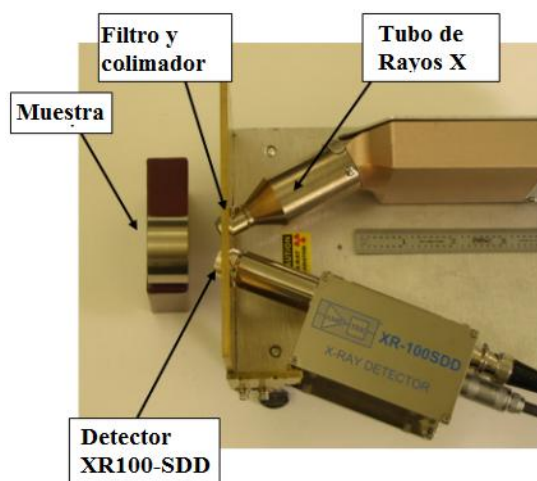


Figura 7. Sistema de instrumentación para XRF [30].

El bombardeo de electrones no solo produce líneas de Rayos X característicos sino que también un espectro de Rayos X o un continuo que cubre todas las energías a partir de E_0 (la energía del electrón incidente). Este espectro se forma a partir de interacciones entre los rayos incidentes y los núcleos atómicos y está dispuesto de la siguiente forma: el eje X representa la energía de Rayos X (usualmente en canales de largo 10 a 20 eV) para un rango de 5 a 50 keV, el eje Y representa el conteo de número de fotones por canal, las intensidades de los Rayos X se mide contando pulsos generados en el detector [30], en XRF el número neto de conteos bajo una línea de Rayo X característica (por ejemplo la integración de la intensidad de un peak) es proporcional a la concentración del analito [32]

Los Rayos X característicos son etiquetados como K, L, M o N para denotar las capas de donde se originaron, además se designa como alfa (α), beta (β) o gamma (γ) a los rayos que se originaron a partir de las transiciones de los electrones provenientes de capas superiores. Por lo tanto un Rayo K α es producido por la transición de un electrón de la capa L a la capa K, y un K β es un Rayo X producido de la transición de un electrón de la capa M a la capa K, etc. Dado que entre las capas hay múltiples órbitas de electrones de unión con energías más altas y más bajas, se hace una designación adicional como a1, a2 o b1, b2, etc., para denotar transiciones de electrones provenientes de estas órbitas en la misma capa inferior.

A veces cuando el átomo retorna a su condición estable, en vez de emitir un Rayo X característico, transfiere la energía de excitación directamente a uno de los electrones exteriores causando que éste sea expulsado del átomo. El electrón expulsado es llamado un electrón “Auger”, éste fenómeno es más probable en elementos con menor número atómico (Z).

3.5.1 Interacción de los Rayos X con la materia

Cuando un rayo atraviesa la materia, algunos fotones serán absorbidos dentro del material o dispersados de su camino original, como muestra la Figura 8.

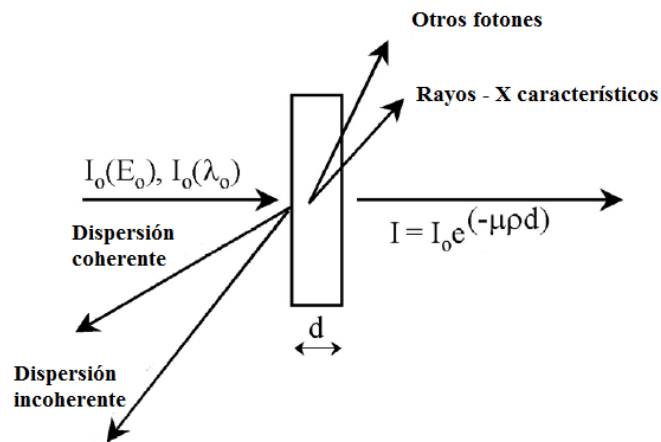


Figura 8. Interacción de fotones de rayos – X con materia [32].

La intensidad I_0 de un haz de rayo – X pasando a través de una capa de espesor d y densidad ρ es reducido a una intensidad I de acuerdo a la ley Lambert – Beer.

$$I = I_0 e^{-\mu\rho d}$$

El número de fotones (la intensidad) es reducido pero su energía no varía. El término μ es llamado coeficiente de atenuación másica y tiene dimensiones de cm^2/g . [32].

Mientras que la medición de Rayos X de fluorescencia en XRF parece ser un tema sencillo, existen algunas consideraciones con respecto a interferencias que deben ser tomadas en cuenta para cualquier análisis. Estas consideraciones se dan a partir de las intensidades medidas las cuales dependen no solo de la concentración del analito,

sino que también de los elementos acompañantes (matriz) los cuales tienen influencia en el solapamiento de peaks, y efectos de absorción másica del analito de interés “i”, debido al elemento coexistente “j”. Otras variables son el tipo de muestra (sólida, líquida, polvo, etc) método de preparación de la muestra, forma y espesor de la muestra analizada y las condiciones de medición como el “setup” geométrico del espectrómetro, tamaño de irradiación, flujo y distribución espectral de la radiación excitadora y la eficiencia de los sistemas de detección [33][34].

4. TRABAJO EXPERIMENTAL

En las siguientes secciones se describen algunos trabajos experimentales previos que fueron utilizados como referencia para el diseño experimental y que conforman la base de la implementación de todo el arreglo utilizado para la combustión del neumático. Además se presentan los procedimientos experimentales en donde se describen los ensayos, los pasos, los cálculos realizados para el desarrollo de la investigación y finalmente la descripción de las muestras utilizadas.

4.2 TRABAJOS EXPERIMENTALES PREVIOS

Para el trabajo experimental se revisaron una serie de investigaciones relacionadas con la producción de gas de síntesis mediante la tecnología de quemadores de medios porosos inertes, algunos de estos trabajos son: Zheng et al. [35] estudio numérico sobre la oxidación parcial de metano en un reactor MPI, para relaciones de equivalencia ricas y ultra-ricas, Toledo et al. [36] estudio experimental sobre la combustión rica y ultra-rica de metano, etano y propano con el fin de estudiar los rangos de temperaturas, velocidades de llama y productos de la combustión. También se revisaron temas relacionados con la combustión híbrida en medios porosos inertes, como los trabajos realizados por Toledo et al. [37] estudio experimental sobre temperaturas, velocidades y productos del frente de combustión en la combustión híbrida de pellets de madera y esferas de alúmina, Salgansky et al. [38] estudio teórico y experimental sobre la combustión híbrida de carbón mineral y material inerte con inyección de aire y vapor para el análisis y comparación de temperaturas y

composición de productos gaseosos. En relación a combustión de neumáticos mediante el uso de reactores de MPI no se encontró información relacionada pero se revisaron estudios como el de Xiao et al. [39] investigación experimental de la gasificación de neumáticos a baja temperatura en reactores de lecho fluidizado para el estudio de la producción de gas de síntesis y negro de carbono.

4.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para trabajo experimental se creó un diseño compuesto principalmente por tres sistemas: el primero es la implementación de un **reactor de medio poroso inerte** con inyección de vapor, el segundo es el sistema de **suministro y control de flujo** del aire y vapor, y el tercero es el **sistema de captación y análisis de residuos**. Para el desarrollo experimental se trabajó en el Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

En la Figura 9 se expone la configuración completa del arreglo experimental.

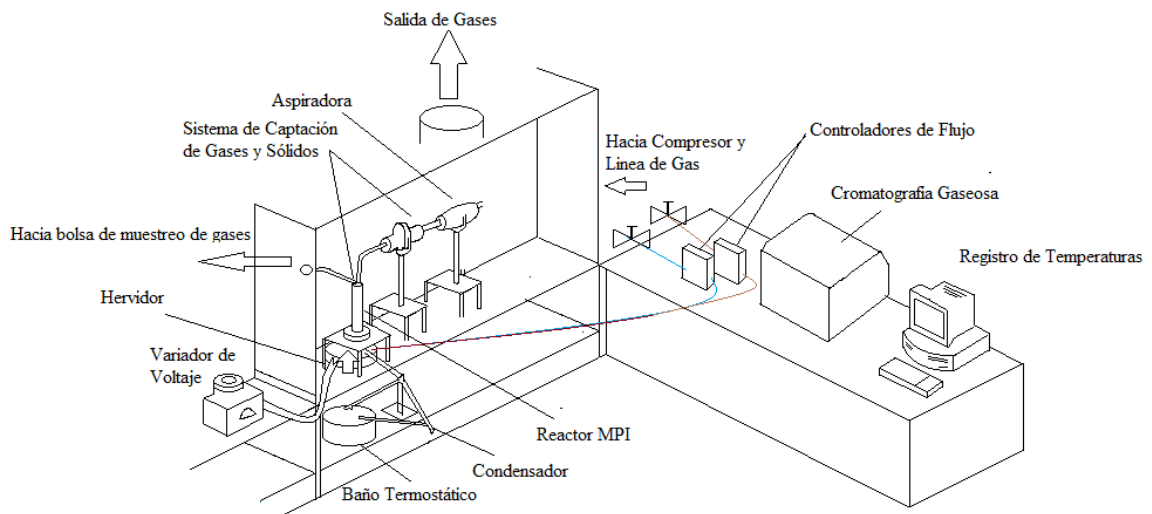


Figura 9. Arreglo experimental

Las características de cada sistema se explican en los puntos siguientes.

4.3.1 Diseño de reactor de medio poroso inerte

El equipo principal para el desarrollo experimental es el reactor de MPI, el cual permite el proceso de combustión híbrida del neumático bajo las condiciones de operación deseadas.

El reactor consiste en un tubo de cuarzo de 340 [mm] de altura y 45,2 [mm] de diámetro interno, revestido de un material aislante de espesor de 4 [mm] que consiste en lana mineral compuesta principalmente de óxido de silicio y óxido de magnesio, que soporta temperaturas sobre los 1500 [°C], el interior del tubo de cuarzo también se aísla con fibra de cerámica de espesor 4 [mm], de esta forma se trata de minimizar al máximo las pérdidas de calor. Para la inyección de vapor se instala en un costado un tubo de cuarzo de 220 [mm] de altura y 93 [mm] de diámetro, ambos están montados en una base de aluminio que posee una cámara con perforaciones de 1,6 [mm] especialmente diseñada para la inyección del combustible (en éste caso se utiliza gas natural) y aire como oxidante para su precalentamiento, además de poseer en sus interior tres O-Rings que permite la prevención de fugas.

Concéntricamente al tubo de cuarzo del reactor se ubica una varilla cerámica fabricada de Óxido de Aluminio/Alúmina (Al_2O_3), la que posee 6 perforaciones por las cuales se pasan las 5 termocuplas tipo S (platino, platino-rodio 10%) que posee el reactor, con una separación entre ellas de 40 [mm] aproximadamente pues no todas se encuentran soldadas, con éstas se logra monitorear la temperatura al interior del reactor. Para la adquisición de temperaturas se utiliza un módulo OMEGA OMB-DAQ-54, conectado a un computador, de esta forma mediante el software Personal DaqView, se obtienen lecturas instantáneas que son grabadas en la memoria del computador, además de presentar un gráfico de las distintas variaciones de temperatura con respecto al tiempo a lo largo del reactor.

El medio inerte consiste en esferas de alúmina de 5,6 [mm] de diámetro que poseen la capacidad de mantenerse químicamente inertes durante el proceso de combustión, gracias a su composición se logra el transporte de calor mediante los métodos de

transferencia de calor por conducción y radiación, poseen un punto de fusión por sobre los 2000 [°C].

El reactor presenta una precarga de aproximadamente 100 [ml] de Al_2O_3 con el objetivo de precalentar el tubo de inyección de vapor y así evitar la condensación de éste dentro del reactor. En la Figura 10 se presenta el esquema del reactor de acuerdo a lo descrito anteriormente:

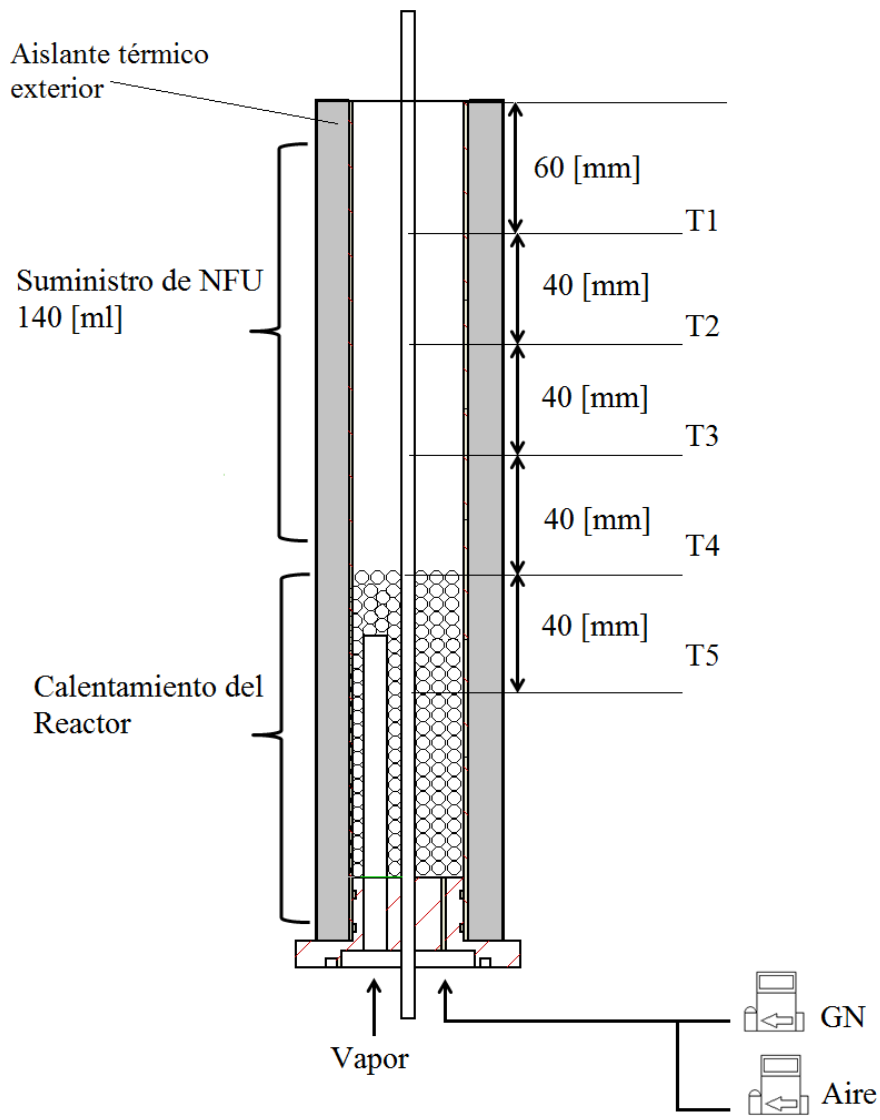


Figura 10. Reactor MPI y posición de termocuplas

4.3.2 Sistema de suministro y control de flujos

El suministro del caudal de gas natural se obtiene de la línea de gas disponible en el laboratorio, el suministro de aire se obtiene a partir de un compresor de pistones que posee un acumulador de 50 litros, ambos gases son regulados por controladores de flujo tipo AALBORG GFC17, los valores de los caudales (en litros por minuto) suministrados al reactor son calculados previamente, mediante la relación de equivalencia a usar en el ensayo de acuerdo a las condiciones de operación que se requieran. Luego de regulados, ambos gases son mezclados y transportados por una sola línea, que consta de una tubería de PVC la cual se une al reactor mediante conexión NPT. El principio de funcionamiento del controlador de flujo y las especificaciones técnicas para cada controlador se presentan a continuación:

Principio de funcionamiento: La corriente de gas que entra al transductor de flujo másico, se separa y una pequeña fracción de flujo se deriva a través de un tubo sensor de acero inoxidable. El gas restante fluye a través del conducto de flujo primario. La geometría de este conducto y la del tubo sensor están diseñados para asegurar un flujo laminar en cada rama. De acuerdo a los principios de dinámica de fluidos, los caudales de un gas en dos conductos de flujo laminar son proporcionales entre sí. Por lo tanto, los caudales medidos por el tubo sensor son directamente proporcionales al flujo total a través del transductor.

Con el fin de detectar el flujo en el tubo sensor, se introducen flujos de calor en dos secciones del sensor por medio de bobinas que permiten el calentamiento. El calor es transferido a través de la pared delgada del sensor al gas que fluye adentro. A medida que el gas pasa, el calor es transportado por la corriente de gas aguas abajo hacia los devanados de la bobina. El diferencial de temperatura se detecta por medio de un circuito de control electrónico. El gradiente medido en el sensor es linealmente proporcional a la tasa de flujo instantánea que pasa.

Una señal de salida es generada como función de la cantidad de calor transportada por el gas para indicar los caudales basados en masas moleculares.

Especificación Técnica:

- Equipo: Controlador de Flujo de **Aire**
- Marca: AALBORG
- Modelo: GFC37
- Rango: 0 – 20 [l/min]
- Resolución: 0,1 [l/min]

- Equipo: Controlador de Flujo de **CH₄**
- Marca: AALBORG
- Modelo: GFC37
- Rango: 0 – 5 [l/min]
- Resolución: 0,01 [l/min]

El sistema de suministro de vapor, se realiza mediante el uso de un generador de vapor compuesto por una olla sellada con una resistencia en su interior, un VARIAC que básicamente es un transformador toroidal que permite la variación de voltaje, un intercambiador de calor de contraflujo, una probeta graduada y un cronómetro, primero se gradúa el voltaje para alcanzar el punto de ebullición del agua en el hervidor. Para medir un valor de caudal de vapor generado, se usa el intercambiador de calor, cuyo objetivo es condensar éste vapor y mediante probeta y cronómetro se mide el caudal de agua generado. De ésta manera se comprueba el cumplimiento de las condiciones termodinámicas de cambio de fase y el cálculo de vapor suministrado. Luego de obtener la cantidad de vapor deseada se realiza la conexión hacia el reactor.

4.3.3 Sistema de captación y análisis de residuos.

Se utilizan dos sistemas diferentes que permiten la captación y un posterior análisis, para los residuos gaseosos se realiza la extracción de gases de escape para análisis por cromatografía gaseosa y para los residuos sólidos la retención de productos volátiles y material particulado para posterior análisis mediante espectrometría de rayos X.

Captación y análisis de gases de escape

La extracción de los gases de escape, producto de los procesos de combustión de neumáticos, se realiza mediante el sumergimiento de una sonda (varilla cerámica) a una profundidad de al menos 50 [mm] en el reactor, que permite extraer éstos con un juego de jeringas y válvulas, y almacenarlos mediante la homogeneización y llenado de una bolsa Tedlar. Antes de ser almacenados en la bolsa, los gases pasan por un proceso de filtrado y secado para no dañar el cromatógrafo, se utiliza filtro de 40 [μm], un recipiente que contiene dióxido de sílice para remover humedad y un filtro de lana mineral.

Se realiza análisis de las concentraciones de H_2 , N_2 , CH_4 , CO y CO_2 de estos gases de escape mediante cromatografía gaseosa, previo a la curva de calibración hecha mediante uso de gas patrón con concentraciones conocidas en el cromatógrafo.

Las especificaciones técnicas del cromatógrafo utilizado son las siguientes:

Especificación Técnica

- Equipo: Cromatógrafo de gases
- Marca: PerkinElmer
- Modelo: Clarus 500 Gas Chromatograph
- Rango de Temperatura Horno: 10°C sobre ambiente hasta 450°C o -99°C a 450°C con accesorios.
- Resolución Horno: 1°C
- Detectores: TCD - FID

La técnica utilizada en éste cromatógrafo de gases es de una columna (fase estacionaria) con una capa porosa de polímero de 1/8" de diámetro y 1 metro de largo empacada con MoleSieve 5A y de detector se usa el TCD.

Captación y análisis de residuos sólidos

Los residuos sólidos, que se producen durante la combustión de los neumáticos, son capturados mediante el uso de papel filtro de fibra de vidrio, de 1,2 [μm] de porosidad y diámetro de 47 [mm] que van dispuestos en un sistema tipo milliporo,

llamado “*sistema de captación de volátiles*” compuesto por dos frascos herméticos de vidrio sujetos con una pinza especial utilizada para sistemas milliporo, tal como se muestra en la Figura 11. En el reactor se sumerge a una profundidad de 50 [mm] aproximadamente un tubo de cuarzo de 93 [mm] de diámetro, el cual se conecta al sistema de captación, mediante una mini aspiradora ubicada en el otro extremo (extremo derecho de la Figura 11) se realiza la extracción y saturación de éste para su posterior análisis.



Figura 11. Sistema de captación residuos sólidos

El análisis de los residuos sólidos se hace mediante espectrometría de rayos X, que forma parte de un conjunto de técnicas utilizadas ampliamente en la determinación de estructuras electrónicas de materiales al ser excitados con distintas fuentes de radiación, en específico la técnica utilizada en este caso fue la fluorescencia de rayos X, en el laboratorio del Departamento de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María. Se utilizó un detector XR-100SDD Silicon Drift Detector (SDD), la ventaja de éste es que posee mucha menor capacitancia que un diodo convencional de la misma área, de manera que se reduce el ruido electrónico a menores tiempos de conformación, para espectrometría de rayos X, un SDD tiene mejor resolución de energía mientras se opera a más altas tasas de conteo que un diodo convencional. El SDD usa una estructura especial de electrodos para guiar los electrones a un ánodo de baja capacitancia [30], las especificaciones del detector son las siguientes:

Especificación Técnica

- Equipo: Detector de rayos X
- Marca: AMPTEK
- Tipo de detector: Silicon Drift Detector (SDD)
- Tamaño del detector: 25 [mm²]
- Espesor Silicio: 500[μm]
- Resolución de energía: 125 – 140 eV FWHM (Anchura a media altura).

En la Figura 12 se presenta una imagen del banco de trabajos, a la derecha en la caja blanca se encuentra tapado el espectrómetro para prevenir la irradiación de rayos X, a la izquierda el computador con el software de adquisición de datos utilizado.



Figura 12. Espectrómetro de rayos – X, UTFSM.

4.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.4.1 Descripción de ensayos.

El procedimiento experimental está enfocado principalmente en analizar el comportamiento de la combustión del neumático cuando se trabaja con vapor de agua en distintas cantidades, considerando esto, los ensayos quedaron estructurados bajo la observación de los siguientes parámetros: Flujo de aire, flujo de vapor, flujo de gas natural y relación volumétrica de un híbrido compuesto por el neumático y el material inerte. Se utiliza un flujo constante de aire de 8 litros por minutos, un volumen total de 140 [ml] para la inyección de neumáticos, el flujo de vapor que se inyecta se

obtiene a partir de una fracción del flujo de aire inyectado al igual que el flujo de gas natural que se calcula a partir de la relación de equivalencia para el flujo indicado.

El procedimiento experimental se divide en cuatro modalidades de operación, en la primera se opera con un flujo de aire constante, una relación de volumen de 50 – 50% y una variación en el flujo de vapor inyectado bajo un rango de interés. En la segunda se corta la inyección de aire, se mantiene la relación volumétrica de 50 – 50% y se hace variar la inyección de vapor dentro del mismo rango de interés. En la tercera modalidad también se trabaja sin inyección de aire, se cambia a una relación volumétrica de 25% medio inerte y 75% de neumáticos, y se hace variar la inyección de vapor. Finalmente se estudia la combustión de neumáticos con relación híbrida 50 – 50%, inyección de vapor y mezcla de gas natural/aire. La Tabla 7 resume los ensayos realizados.

Tabla 7. Ensayos experimentales

Modo de Operación	No.	Caudal Aire	Caudal Vapor	Caudal Vapor	Hibrido	Hibrido	ϕ
	-	[l/min]	[%]	[l/min]	[%]	[mL]	-
1	1	8	0	0	50-50	70-70	-
	2	8	20	1,6	50-50	70-70	-
	3	8	40	3,2	50-50	70-70	-
	4	8	60	4,8	50-50	70-70	-
2	5	-	20	1,6	50-50	70-70	-
	6	-	40	3,2	50-50	70-70	-
	7	-	60	4,8	50-50	70-70	-
3	8	-	20	1,6	25-75	35-105	-
	9	-	40	3,2	25-75	35-105	-
	10	-	60	4,8	25-75	35-105	-
4	11	7,74	0	0	50-50	70-70	0,3
	12	7,74	20	1,6	50-50	70-70	0,3
	13	7,74	40	3,2	50-50	70-70	0,3
	14	7,74	60	4,8	50-50	70-70	0,3

4.4.2 Cálculo de flujo para mezclas aire combustible.

Como se mencionó en el punto 4.1.1, se requiere la inyección de una mezcla de aire combustible para precalentar la zona de inyección de vapor e inyección del híbrido, además se utilizará un flujo de gas natural/aire para estudiar sus efectos en la combustión y gasificación del neumático. En los cálculos siguientes se presenta la forma en que se calculan los diferentes caudales de aire y de combustible para distintas relaciones de equivalencia considerando un flujo de mezcla de 8 litros por minuto.

El combustible utilizado es el gas natural procedente de la línea del laboratorio, cuya composición se obtiene a partir de la información entregada por GasValpo en su sitio web, donde se indica que está compuesto mayormente por metano y etano. Se utiliza una composición en volumen de 90% metano y 10% etano.

En primer lugar se obtiene el análisis elemental del combustible.

Se tiene la siguiente composición en volumen:

$$X_{CH_4} = 0,9$$

$$X_{C_2H_6} = 0,1$$

Y las masas moleculares de los compuestos de interés son:

$$M_C = 12,011 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$M_H = 1,008 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$M_O = 15,999 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$M_N = 14,006 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$M_S = 32,065 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

En 1 [kmol] de mezcla de combustible se tiene:

- Masa de carbono

$$m_C = (X_{CH_4} + 2X_{C_2H_6}) * M_C = 13,212 [kg]$$

- Masa de hidrógeno

$$m_H = (4X_{CH_4} + 6X_{C_2H_6}) * M_H = 4,233 [kg]$$

- Masa de nitrógeno

$$m_N = 0 [kg]$$

- Masa de azufre

$$m_S = 0 [kg]$$

Por lo tanto, la masa total del combustible es

$$m_{comb} = 17,445 [kg]$$

Además

- Fracción másica de carbono

$$Y_C = \frac{m_C}{m_C + m_H + m_O + m_N + m_S} = 0,7573$$

- Fracción másica de hidrógeno

$$Y_H = 1 - C = 0,2426$$

El análisis elemental del combustible es entonces:

$$Y_C = 75,73\%$$

$$Y_H = 24,26\%$$

$$Y_O = Y_N = Y_S = 0\%$$

El caudal volumétrico total de la mezcla viene dado por

$$\dot{V}_{mezcla} = \dot{V}_a + \dot{V}_{comb} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Ó bajo condiciones normales como

$$\dot{V}_{mezcla}^{(0)} = \left(\dot{V}_a^{(0)} + \dot{V}_{comb}^{(0)} \right) \left[\frac{Nm^3}{s} \right]$$

El caudal de aire para la combustión en condiciones normales viene dado por

$$\dot{V}_a^{(0)} = V_a * \dot{m}_{comb} \left[\frac{Nm^3}{s} \right]$$

Se define la relación de equivalencia (φ) como la relación combustible/aire normalizada con respecto a la relación combustible/aire estequiométrica, como se observa es la inversa de la relación aire combustible (λ), de manera que cuando se habla de mezclas pobres, $\varphi < 1$ y para mezclas ricas $\varphi > 1$.

Se tiene entonces

$$\varphi = \frac{V_{a,e}}{V_a}$$

De aquí

$$V_a = \frac{V_{a,e}}{\varphi}$$

Reemplazando para el caudal de aire de combustión

$$\dot{V}_a^{(0)} = \frac{V_{a,e}}{\varphi} * \dot{m}_{comb} \left[\frac{Nm^3}{s} \right]$$

Luego se obtiene el volumen de aire estequiométrico, que corresponde a la cantidad de aire teóricamente necesaria para suministrar el oxígeno requerido en una combustión completa.

$$V_{a,e} = \frac{22,39}{0,21} \left(\frac{C}{12,011} + \frac{H}{4,032} + \frac{S}{32,065} - \frac{O}{32} \right) = 13,13 \left[\frac{Nm^3}{kg} \right]$$

Por lo tanto se tiene que por cada kg de combustible que se quiera quemar, se requerirán 13,13 [Nm³] de aire.

El flujo másico de combustible se calcula como

$$\dot{m}_{comb} = \dot{V}_{comb}^{(0)} * \rho_{comb}^{(0)} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

La densidad del gas natural se puede calcular como

$$\rho_{comb} = X_{CH_4} * \rho_{CH_4} + X_{C_2H_6} * \rho_{C_2H_6}$$

O bien como gas ideal

$$\rho_{comb}^{(0)} = \frac{P_0}{RT_0}$$

Considerando P₀ = 101325 [Pa] y T₀ 273,15 [K]. La constante del gas para éste combustible viene dada por

$$R = \frac{R_u}{m_{comb}} = 476,58 \left[\frac{J}{kg K} \right]$$

Con R_u = 8314 [J/kmolK] y la masa total del combustible obtenida a partir del análisis elemental. Por lo tanto

$$\rho_{comb}^{(0)} = 0,778 \left[\frac{kg}{Nm^3} \right]$$

Reemplazando, el caudal total de la mezcla aire combustible queda:

$$\dot{V}_{mezcla} = \left(\frac{V_{a,e}}{\varphi} * \dot{V}_{comb}^{(0)} * \rho_{comb}^{(0)} + \dot{V}_{comb}^{(0)} \right) \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Despejando el caudal volumétrico de combustible corregido por presión y temperatura, se obtiene:

$$\dot{V}_{comb}^{(0)} * \frac{P_0}{P} * \frac{T}{T_0} = \dot{V}_{comb} = \frac{\dot{V}_{mezcla}}{1 + \left(\frac{V_{a,e} * \rho_{comb}^{(0)}}{\varphi} \right)} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

De aquí con los valores obtenidos anteriormente, considerando un caudal de mezcla de 8 litros por minuto y que en el laboratorio se trabaja a presión atmosférica y temperatura ambiente, se obtiene una relación para el caudal volumétrico de combustible para distintos valores de la relación de equivalencia.

Los controladores de flujo utilizados entregan los valores del caudal en litros por minutos de manera que se debe hacer la conversión:

$$\dot{V}_{comb} \left[\frac{m^3}{s} \right] * 1000 \left[\frac{l}{m^3} \right] * 60 \left[\frac{s}{min} \right] = \dot{V}_{comb} \left[\frac{l}{min} \right]$$

Además

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{mezcla} - \dot{V}_{comb} \left[\frac{l}{min} \right]$$

En la Tabla 8 se detallan los valores utilizados para ambos flujos durante el precalentamiento del reactor, además de la dirección del frente de combustión de acuerdo a las distintas relaciones de equivalencia utilizadas.

Tabla 8. Flujos de aire y combustible para distintas relaciones de equivalencia.

Relación de equivalencia	Aire	Combustible	Dirección Frente de Combustión
ϕ	[l/min]	[l/min]	-
0,3	7,74	0,24	Aguas arriba
0,8	7,37	0,63	Aguas abajo
1	7,23	0,77	Aguas abajo
1,2	7,09	0,91	Aguas abajo
1,4	6,91	1,09	No hay movimiento
1,6	6,83	1,17	Aguas arriba
1,8	6,76	1,24	Aguas arriba

4.4.3 Cálculo de flujo de vapor.

Para obtener el caudal deseado en las distintas condiciones de operación, se mide en una probeta graduada el volumen en mililitros de vapor condensado durante cierto intervalo de tiempo. Se utiliza el software *ChemicaLogic SteamTab Companion* para conocer las propiedades del agua en sus diferentes estados presentados en la Tabla 9.

Tabla 9. Volumen específico del agua para distintas fases.

Fase	Temperatura	Volumen específico
	[°C]	[m ³ /kg]
Vapor Saturado	100	1,67177
Líquido Saturado	18	0,00100301

El volumen de agua que se debe medir a partir del caudal volumétrico de vapor que se quiere inyectar se obtiene de la siguiente forma:

$$\dot{V}_{liq} = \frac{\dot{V}_{vap} * V_{liq}}{V_{vap}} * 10^3 \left[\frac{ml}{min} \right]$$

La Tabla 10 muestra los valores calculados para los tres porcentajes de operación, considerando la resolución de la probeta graduada.

Tabla 10. Volumen específico del agua para distintas fases.

Fracción inyectada	Volumen de vapor inyectado	Volumen de agua medido
%	[l/min]	[ml/min]
20	1,6	1
40	3,2	1,9
60	4,8	2,9

4.4.4 Descripción de muestras de NFU.

Las muestras se obtienen de un neumático marca “GoodYear” 165/70R13 79S de fabricación brasileña, al cual se le removió la banda de rodadura como se muestra en Figura 13.

Para las características de la composición del combustible, es decir, su análisis próximo y análisis elemental se utilizará como valores referenciales los expuestos en la Tabla 4 “*Comparación de las características química NFU v/s Carbón*” de éste informe.



Figura 13. Muestras de neumáticos para gasificar.

Luego se redujo aún más para obtener pellets de neumáticos comerciales lo más parecida a un TDF con un 90% de alambre removido con lados de 5 [mm] aproximadamente, similar al tamaño de la alúmina utilizada como medio inerte, el triturado fue realizado con métodos físicos, en la Figura 14 se presenta un ejemplo de éstos.



Figura 14. Pellets de NFU.

De acuerdo a las capacidades volumétricas del reactor se definió un volumen de inyección de 140 [ml] de material híbrido compuesto por una proporción de NFU más alúmina medidas en probeta graduada, donde se mezclan para homogeneizar la muestra antes de su inyección.

Los porcentajes de NFU y Al_2O_3 inyectados, así como los volúmenes se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Volumen de NFU para gasificar.

Fracción Inyectada	Vol. NFU	Masa de NFU	Vol. Al_2O_3	Volumen Total
[%]	[ml]	[g]	[ml]	[ml]
50	70	34,06	70	140
75	105	51,1	35	73

4.4.5 Cálculo de velocidad del frente de combustión.

Para el cálculo de la velocidad de propagación del frente de combustión se debe considerar la disposición de las termocupas dentro del reactor, estas se encuentran espaciadas a una distancia de 4 [cm]. Mediante el adquisidor de datos se registran los tiempos en los cuales se alcanzan los peaks de temperatura para las distintas termocupas de manera que la velocidad se calcula como:

$$v = \frac{4}{(t_{T_{n+1}} - t_{T_n})} \left[\frac{cm}{s} \right]$$

Siendo n el número de la termocupla y t el tiempo en el cual se registró el máximo de temperatura.

4.4.6 Procedimiento para puesta en marcha y precalentamiento del reactor.

En este procedimiento se expone cómo dejar listas las conexiones para comenzar con la primera parte del ensayo que consiste en precalentamiento del reactor, se contempla generar un frente de combustión mediante flujos de aire y gas natural, en un medio inerte a partir de la termocupla No.3, que luego se filtra aguas arriba del reactor.

1. Determinar parámetros de operación del ensayo: relaciones de equivalencia utilizadas para el movimiento del frente de llama aguas arriba y aguas abajo.
2. Preparar la muestra de híbrido que se ensayará.
3. Encendido del compresor para la alimentación de aire hacia el reactor.
4. Verificar presión de trabajo del compresor en 2 [bar].
5. Conexión eléctrica de los controladores de flujo de aire y gas natural.
6. Apertura de válvulas de paso de ambos flujos.
7. Realizar ajuste a cero de ambos controladores, esperar estabilización.
8. Verificar condiciones del reactor (cuarzo sin fisuras, reactor limpio con aislamientos en buen estado).
9. Llenado del reactor con Al_2O_3 hasta Termocupla No. 4 (volumen aproximado de 100[ml]).
10. Conexión de termocuplas con módulo adquiridor de datos.
11. Conexión USB de módulo adquiridor de datos con computador.
12. Configuración de software de adquiridor de datos pDAQView, selección de termocuplas tipo S, medición en grados Celsius y frecuencia de adquisición 1 [Hz].
13. Verificar mediante software pDAQView que temperaturas en el reactor sean cercanas a temperatura ambiente.
14. Colocar dentro de lugar de trabajo sistema de captación de residuos sólidos.

15. Conectar aspiradora de sistema de captación de sólidos a conexión USB de computador.
16. Conectar tubería desde controladores para permitir flujo de mezcla hacia reactor.
17. Comenzar adquisición de temperaturas para monitorear frente de combustión.
18. Girar primero potenciómetro de controlador de aire para comenzar la inyección de éste, luego la de gas natural.
19. Alcanzada la relación de equivalencia $\phi = 0,8$, prender con fósforo parte superior del reactor.
20. Comprobar que no existan fugas en puntos de unión de tuberías, mediante solución jabonosa.

4.4.7 Procedimiento para inyección de vapor.

Simultáneamente al procedimiento de precalentamiento del reactor se debe comenzar con la preparación de la inyección de vapor, de esta forma cuando se mantenga en altas temperaturas el reactor, se pueda asegurar una inyección sin condensación.

1. Conectar el generador de vapor hacia el intercambiador de calor, mediante unión T.
2. Cerrar la otra salida de la unión T, para dirigir todo el vapor hacia el intercambiador.
3. Ubicar recipiente bajo salida de intercambiador para almacenar vapor condensado.
4. Enchufar y encender bomba de fluido refrigerante.
5. Conectar VARIAC (transformador toroidal) a generador de vapor.
6. Enchufar VARIAC.
7. Enchufar generador de vapor.
8. Ajustar voltaje del VARIAC para hervir agua.
9. Luego de comenzada a hervir el agua, ajustar a posición estimada para flujo de vapor deseado.
10. Medir flujo de condensado mediante probeta y cronómetro.

11. Realizar ajustes si se requieren para cantidad de flujo deseado.
12. Realizar cuatro mediciones para comprobar flujo.
13. Verificar que zona de precalentamiento se encuentre a altas temperaturas.
14. Conectar generador de vapor hacia el reactor.
15. Apagado de bomba de fluido refrigerante.
16. Ajustar relación de equivalencia a $\phi = 1,4$.

4.4.8 Procedimiento para combustión de neumáticos.

Luego de realizar el precalentamiento y la inyección de vapor en el reactor se procede a realizar el ensayo de la combustión de la mezcla híbrida compuesta por neumático y alúmina.

1. Colocarse mascarilla y guantes de seguridad
2. Prender extractor de aire.
3. Comprobar que temperaturas del reactor se mantengan estables y por sobre los 500 [°C].
4. a. Cortar flujo de gas natural en el reactor mediante ajuste del potenciómetro del controlador.
4. b. Ajustar relación de equivalencia 0,3 si es que se realiza quema con gas natural.
5. Agregar mezcla híbrida en la parte superior del reactor evitando que esta caiga fuera.
6. Observar descenso de temperaturas dentro del reactor al momento de agregar la mezcla
7. Cortar suministro de aire mediante ajuste en el potenciómetro del controlador para conjuntos 2 y 3.
8. Observar aumento paulatino de temperaturas a partir de la tercera termocupla.
9. Poner en la parte superior del reactor sondas de extracción de material sólido y gases.
10. Encender aspiradora de sistema de captación de sólidos.

11. Preparar bolsa Tedlar para muestra gaseosa.
12. Realizar homogenización de canales de extracción de mezcla gaseosa.
13. Tomar muestra gaseosa cuando termocupla No.2 alcance peak de temperatura.
14. Observar si existe descenso de temperaturas dentro del reactor para concluir el cese de la combustión o la salida del frente de llama en la parte superior del reactor.
15. Ensayo finalizado.

4.4.9 Procedimiento para cromatografía gaseosa.

A continuación se explica cómo se debe proceder para la toma y análisis de las muestras gaseosas.

1. Abrir válvulas de Helio que se encuentran detrás del cromatógrafo.
2. Encender cromatógrafo cambiando posición del switch.
3. Encender computador que realiza el mando del cromatógrafo
4. Abrir software TotalChrom Navigator.
5. Presionar “Login” en pantalla de cromatógrafo
6. Cargar método “Mols” para cromatografía gaseosa.
7. Esperar a que horno alcance temperatura de 200 [°C] y que TCD se encuentre por sobre los 0,95 [mV]
8. Homogeneizar la jeringa tres veces que se utilizará para la inyección de la mezcla en canal B.
9. Presionar Ejecutar e inyectar.

4.4.10 Procedimiento para captación de residuos sólidos.



A continuación se explica cómo se obtiene la muestra sólida que es analizada luego mediante espectrometría de rayos X, la configuración y calibración del equipo es realizada por el encargado en el Departamento de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María.

1. Colocarse guantes de látex y mascarilla para prevenir que se adhieran elementos indeseados en papel filtro.

2. Utilizar pinzas para colocar papel filtro en sistema de captación.
3. Cerrar el sistema de captación con pinza metálica.
4. Ubicar soportes en banco de trabajo y montar sistema de captación.
5. Conectar sistema de captación con salida del reactor mediante varilla cerámica y tubería.
6. Conectar por la otra salida del sistema de captación la aspiradora USB y energizar.
7. Al momento que se realice la inyección del híbrido y cortado el suministro de aire (Puntos 8 del Procedimiento 4.2.7) iniciar la extracción.
8. Para la remoción del papel utilizar pinza, guante y mascarilla.
9. Guardar muestra sólida en Placa de Petri.

4.4.11 Procedimiento para espectrometría mediante fluorescencia de rayos – X.

A continuación se explica el procedimiento para pasar las muestras de papel filtro saturado en el espectrómetro de rayos – X.

1. Conectar detector y motor eléctrico a línea de corriente.
2. Realizar conexión USB de detector.
3. Abrir software “AMPTEK – DppMCA”
4. Luego del reconocimiento del puerto USB del detector y tubo, presionar “Connect”.
5. Realizar calibración usando placas de cobre y plata.
6. Para la toma de muestra presionar switch del motor eléctrico para tomar una superficie más amplia de la muestra.
7. Presionar “Mini – X Controller” , setear como parámetros: voltaje 35[kV] y corriente 100 [μA], luego “Ok”
8. Comenzar adquisición de datos, tiempo de muestreo 300 segundos.
9. Presionar “Calibrate”  seleccionar peak de cobre, anotar valor del canal y energía (8,04 keV) hacer lo mismo para la plata (22,16 keV).
10. Realizada la calibración presionar A, para limpiar espectro de Cu - Ag.

11. Depositar el papel filtro para comenzar una nueva adquisición.

4.4.12 Procedimiento para apagado del reactor.

Luego de realizada la experiencia se explica cómo se procede a apagar el reactor lo que da como resultado la finalización del ensayo.

1. Detener registro de temperaturas y guardar datos.
2. Cortar flujo de aire si es que es el caso mediante uso de potenciómetro en controlador.
3. Cerrar válvula de aire si es el caso.
4. Cortar suministro de vapor dejando el voltaje del VARIAC en cero.
5. Cerrar línea que une el generador de vapor con el reactor.
6. Desenergizar compresor de aire.
7. Desenergizar controladores de línea de corriente.
8. Cerrar software pDAQView luego de haber guardado los datos.
9. Desconectar el modulo de adquisición de datos del computador
10. Apagar computador
11. Proceder con el apagado del cromatógrafo.

4.4.13 Procedimiento para apagado del cromatógrafo.

Luego de haber realizado el muestreo en cromatografía gaseosa se procede al apagado del cromatógrafo, el cual solo se realiza cuando éste indica condición *stand - by* y nunca durante la realización de un muestreo.

1. Pulsar “Lanzar” en la pantalla táctil del cromatógrafo, de esta forma se libera el mando del computador.
2. Cerrar software TotalChrom Navigator y apagar el computador.
3. Fijar en 100 [°C] la temperatura del horno del cromatógrafo.
4. Esperar a que se alcance la temperatura indicada, lo cual demora 30 minutos.
5. Presionar “Cerrar Sesión” en pantalla táctil del cromatógrafo.
6. Cerrar válvulas de suministro de Helio.
7. Presionar switch del cromatógrafo para apagarlo.

5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan los gráficos obtenidos a partir del registro de temperaturas a lo largo del tiempo, de aquí se obtienen datos sobre el comportamiento térmico interno del reactor, temperaturas máximas, y avance del frente de llama en los casos en donde se produzca. Los gráficos se separan en cuatro conjuntos, correspondientes a cada tipo de operación.

Además se presentan los elementos identificados mediante espectrometría de rayos – X, se encuentra tabulada la línea de energía en donde se identifica el peak característico, la intensidad de cada elemento obtenida por el software en cuentas de fotones por segundo en cada canal, y la intensidad relativa al peak máximo medido.

Finalmente se presentan los productos de la combustión encontrados mediante cromatografía gaseosa y un análisis comparativo en función de los resultados obtenidos.

5.1 CONJUNTO 1: ENSAYOS CON FLUJO DE AIRE/VAPOR Y RELACIÓN HÍBRIDA 50-50%

5.1.1 Perfiles de temperatura en función del tiempo.

A continuación se presenta los gráficos de la variación de temperatura en función del tiempo, correspondientes a las experiencias con flujo de aire, variación en el caudal de vapor y con relación híbrida 50 -50%.

Las condiciones de operación son las siguientes:

- Flujo de Aire: 8 [l/min]
- Flujo de Vapor: 0 - 1,6(20%) - 3,2(40%) – 4,8(60%) [l/min]
- Relación Híbrida: 50 – 50 [%]
- Relación de equivalencia: 0 [-]

Gráfico 0% Vapor

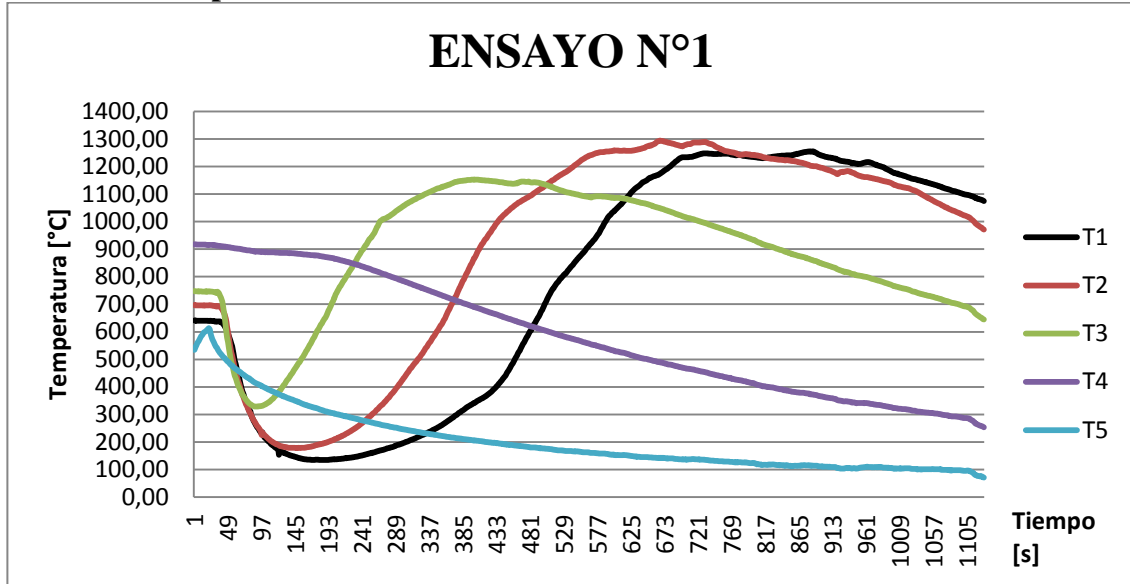


Gráfico 4. Perfil de temperatura para 0% Vapor, 8 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.

Gráfico 20% Vapor

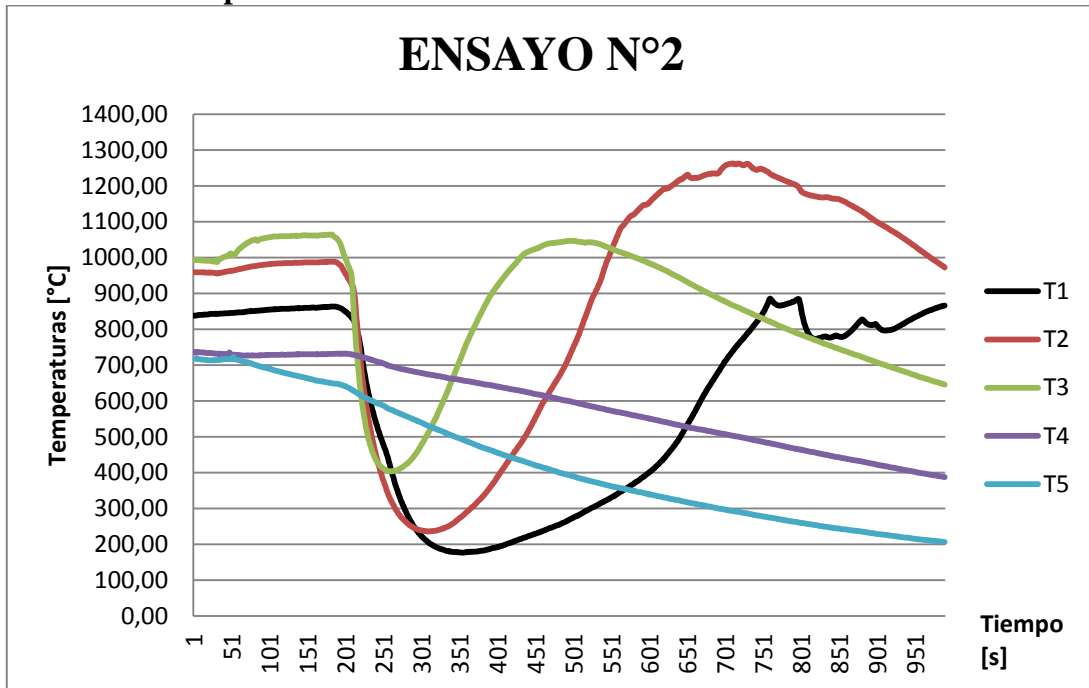


Gráfico 5. Perfil de temperatura para 20% Vapor, 8 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.

Gráfico 40% Vapor

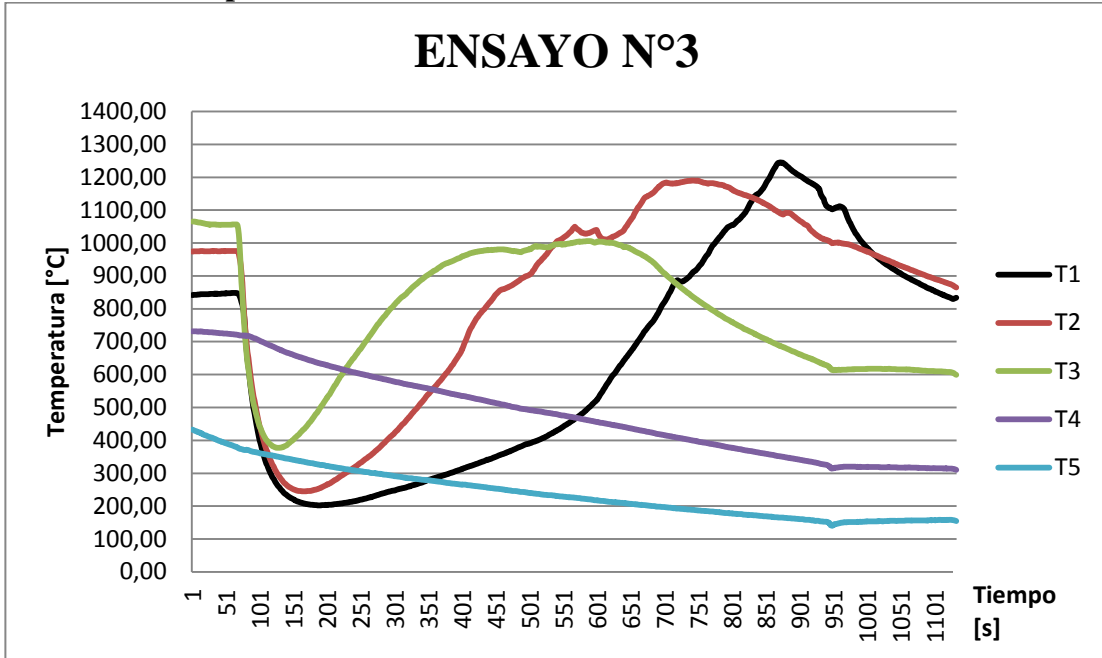


Gráfico 6. Perfil de temperatura para 40% Vapor, 8 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.

Gráfico 60% Vapor

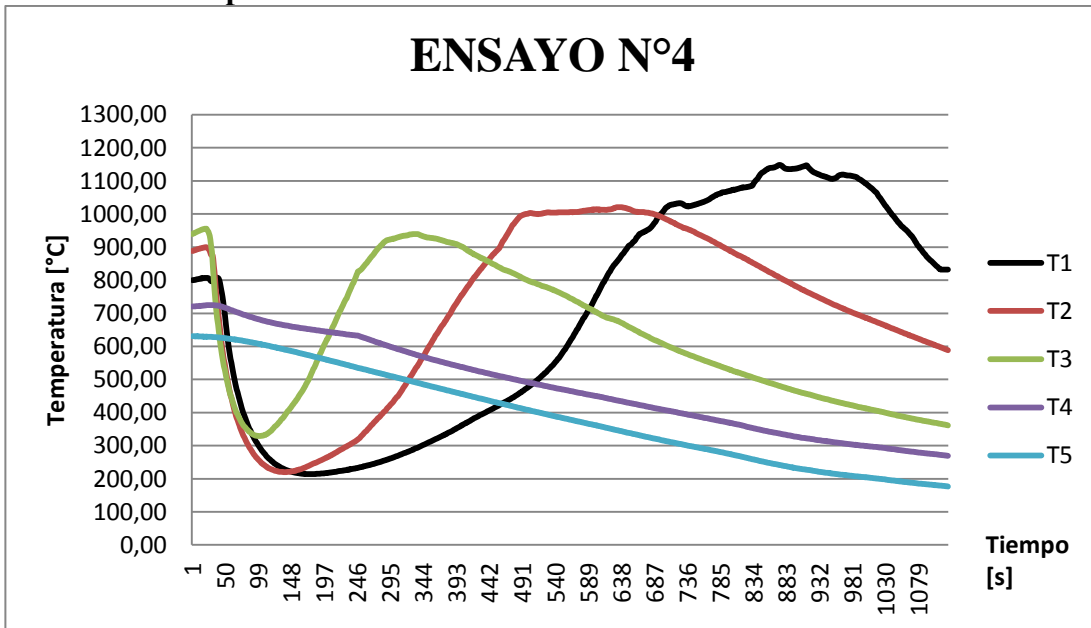


Gráfico 7. Perfil de temperatura para 60% Vapor, 8 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.

5.1.2 Temperaturas máximas y velocidad del frente de combustión

Se presentan los promedios de las temperaturas máximas obtenidas en las tres termocuplas de interés, también las velocidades promedio de propagación del frente de combustión.

Tabla 12. Temperaturas máximas y velocidad de propagación conjunto 1.

No.	Caudal Aire [l/min]	Caudal Vapor [%]	Hibrido [%]	ϕ [-]	Temperaturas máximas promedio [°C]	Velocidad de propagación [cm/s]
-						
1	8	0%	50-50	-	1294,39	0,017
2	8	20%	50-50	-	1065,02	0,019
3	8	40%	50-50	-	1147,12	0,029
4	8	60%	50-50	-	1036,31	0,015

A continuación se presenta la distribución de temperaturas máximas registradas por las termocuplas en la zona de interés.

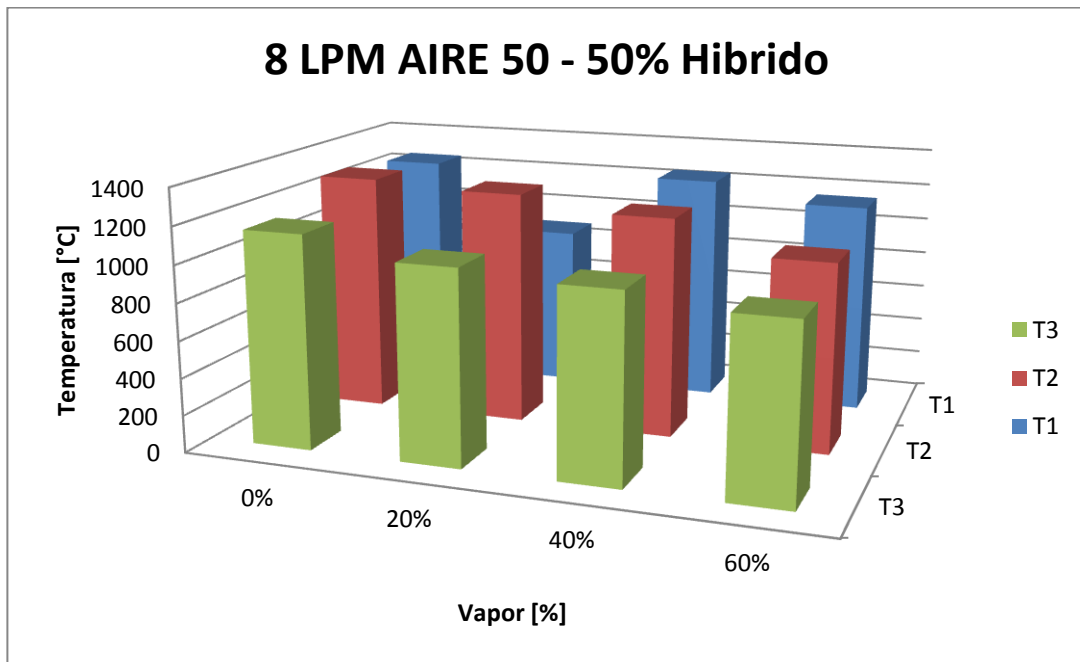


Gráfico 8. Distribución de temperaturas máximas para el conjunto 1 de ensayos.

5.1.3 Resultados espectrometría de rayos – X

En las Tablas 13, 14, 15 y 16 se presentan los resultados para los ensayos No.1 a No.4. Se calcula la intensidad relativa con respecto al peak de mayor intensidad.

Tabla 13. Resultados de espectrometría Ensayo N°1.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	[%]
K	K $\alpha_{1,2}$	3,37	3,12	0,73
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,69	7,35	1,72
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,55	4,09	0,96
V	K $\alpha_{1,2}$	4,91	3,51	0,82
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,45	3,81	0,89
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,09	3,64	0,85
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,60	427,7	100,00

Tabla 14. Resultados de espectrometría Ensayo N°2.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,30	4,04	1,17
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,69	5,10	1,48
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,43	7,53	2,18
V	K $\alpha_{1,2}$	4,85	5,02	1,45
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,42	4,39	1,27
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,07	5,17	1,50
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,67	345,63	100,00

Tabla 15. Resultados de espectrometría Ensayo N°3.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,32	7,33	1,95
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,69	5,74	1,53
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,50	1,89	0,50
V	K $\alpha_{1,2}$	4,87	7,48	1,99
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,39	4,14	1,10
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	4,80	1,28
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,64	375,99	100,00

Tabla 16. Resultados de espectrometría Ensayo N°4.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,32	4,10	1,03
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,66	10,02	2,51
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,48	4,93	1,24
V	K $\alpha_{1,2}$	4,90	2,63	0,66
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,42	3,31	0,83
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	2,40	0,60
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,61	399,11	100,00

5.1.4 Resultados de cromatografía gaseosa

En la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos de la cromatografía gaseosa, las muestras fueron tomadas cuando el frente de combustión pasa por la termocupla No.2

Tabla 17. Resultados de cromatografía gaseosa conjunto 1 de ensayos.

Variables				Cromatografía gaseosa				
No.	Caudal Aire	Caudal Vapor	Hibrido	H ₂	CH ₄	CO ₂	CO	Syngas
-	[l/min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	8	0	50-50	3,27	0,22	0,00	4,05	7,32
2	8	20	50-50	2,05	0,00	0,00	3,21	5,26
3	8	40	50-50	0,18	0,00	0,00	2,51	2,69
4	8	60	50-50	0,15	0,00	3,07	0,41	0,56

5.1.5 Análisis de resultados conjunto 1

Los gráficos 4, 5, 6, 7 presentan la variación de temperatura en función del tiempo para los distintos caudales de vapor estudiados, de aquí se obtiene una visualización del comportamiento térmico del reactor, apareciendo un frente de combustión que sube a lo largo del reactor hasta su parte superior, es decir, aguas abajo. Se observa en primer lugar, que a excepción del Ensayo N°2, el tiempo de la combustión total del neumático se encuentra en los 16 [min], el Ensayo N°2 tiene una duración de 12 [min] aproximadamente. La razón de la disminución del tiempo en éste ensayo es que existe parte del neumático que cayó fuera del reactor. Se aprecia que la inyección de vapor cuando existe presencia de aire no altera los tiempos de combustión del

neumático para los caudales utilizados, además se comprobó experimentalmente que para estos puntos no se encuentran remanentes del combustible sólido dentro del reactor.

El gráfico 8 muestra que en términos generales la inyección de vapor disminuye las temperaturas máximas de combustión, pues a medida que se aumenta el porcentaje de vapor las temperaturas van decreciendo en las termocuplas No.2 y No.3. La termocupla No.1 presenta un comportamiento errático debido al re-empacamiento del reactor durante la combustión del neumático. Se observa que la termocupla No.3, donde se encuentra la entrada de vapor presenta los peak de temperatura con menor valor, esto se explica por las reacciones endotérmicas que ocurren en ésta zona, en donde la carga de inyección híbrida que entra a temperatura ambiente, absorbe energía del medio inerte precalentado y el vapor de agua entrante. Luego se producen máximos de temperaturas mayores en las termocuplas No.2 y No.1. Las velocidades de propagación del frente de combustión, a excepción del Ensayo N°3, resulta ser similar en las distintas experiencias con una velocidad promedio de 1 [cm/min].

Con respecto a los resultados de la espectrometría de rayos – X se logra detectar Ca, K, Ti, V, Fe, Cu y Zn lo cual permite validar referencia utilizada sobre algunos elementos encontrados en el material particulado existente en la gasificación de neumáticos [13]. El elemento con mayor preponderancia es el Zinc, luego los demás elementos se encuentran con mucha menor intensidad, estas no superan el 2%. De acuerdo a las mediciones de intensidad por segundo se observa que el porcentaje de Zinc que aparece en la muestra se reduce cuando la cantidad de vapor inyectado aumenta, caso contrario al del Calcio que aparece con mayor intensidad a medida que el porcentaje de vapor aumenta.

La Tabla 17 presenta los resultados obtenidos de la cromatografía gaseosa, se observa que a medida que aumenta el porcentaje de vapor la producción de H₂ se reduce lo mismo sucede para el CO, no se presenta formación de CH₄ para el punto con 60% de vapor la formación de CO se reduce, comenzándose a producir CO₂.

5.2 CONJUNTO 2: ENSAYOS CON FLUJO DE VAPOR Y RELACIÓN HÍBRIDA 50-50%

5.2.1 Perfiles de temperaturas en función del tiempo.

A continuación se presenta los gráficos de temperatura en función del tiempo, correspondientes a las experiencias sin flujo de aire con variación en el caudal de vapor y con relación híbrida 50 -50%.

Condiciones de operación:

- Flujo de aire: 0 [l/min]
- Flujo de vapor: 1,6(20%) - 3,2(40%) – 4,8(60%) [l/min]
- Relación híbrida: 50 – 50 [%]
- Relación de equivalencia: 0 [-]

Gráfico 20% Vapor

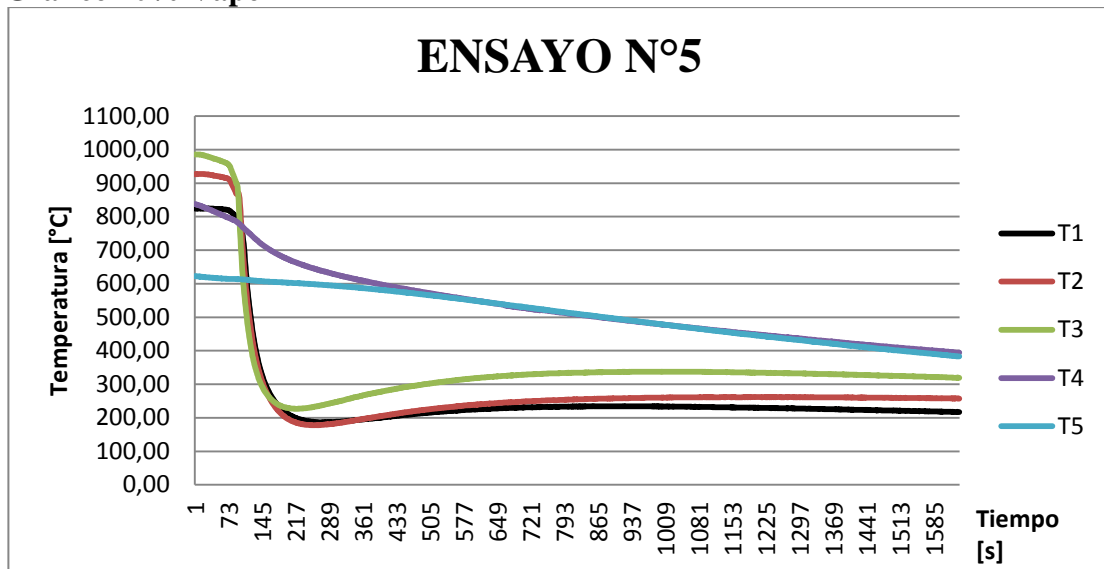


Gráfico 9. Perfil de temperatura para 20% Vapor, 0 LPM Aire, 50 – 50% Híbrido.

Gráfico 40% Vapor

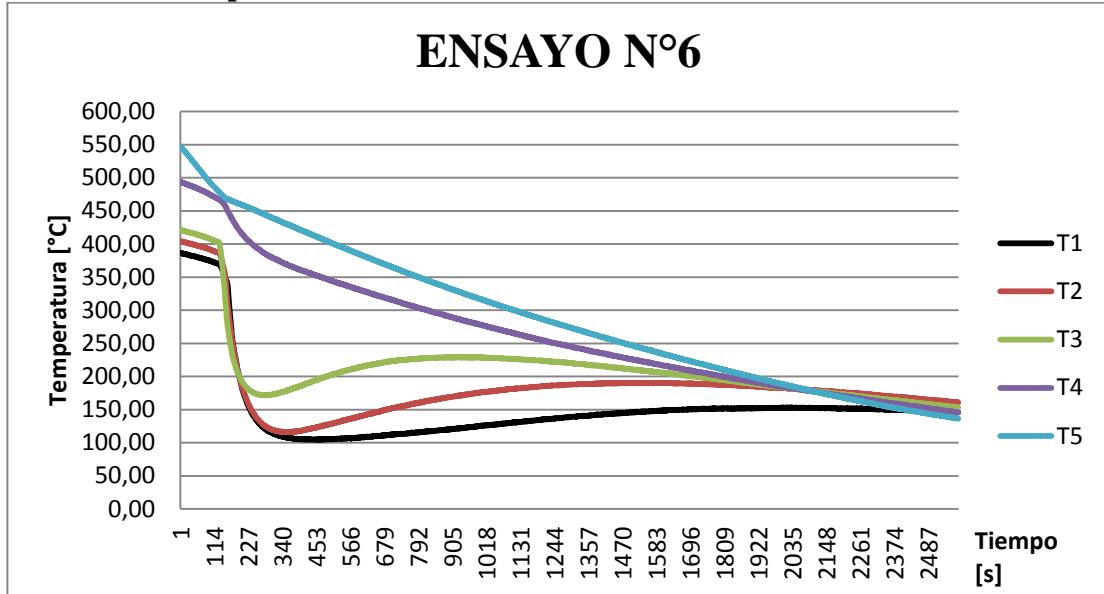


Gráfico 10. Perfil de temperatura para 40% Vapor, 0 LPM Aire, 50 – 50% Hibrido.

Gráfico 60% Vapor

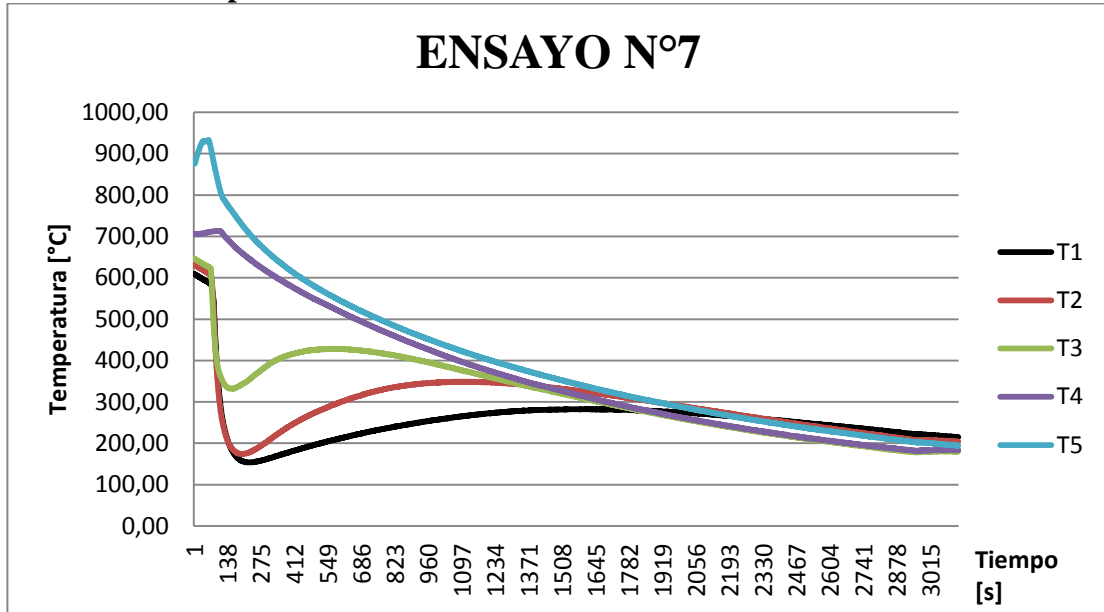


Gráfico 11. Perfil de temperatura para 60% Vapor, 0 LPM Aire, 50 – 50% Hibrido.

5.2.2 Temperaturas máximas medidas

Se presentan los resultados para las temperaturas máximas promedio en las tres termocuplas de interés.

Tabla 18. Temperaturas máximas y velocidad de propagación conjunto 2.

No.	Caudal Aire	Caudal Vapor	Hibrido	ϕ	Temperaturas máximas promedio	Velocidad de propagación
-	[l/min]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[cm/s]
5	-	20%	50-50	-	278,15	No hay frente
6	-	40%	50-50	-	191,14	No hay frente
7	-	60%	50-50	-	353,38	No hay frente

A continuación se presenta la distribución de temperaturas máximas registradas en las tres termocuplas para las zonas de interés. Se indica de acuerdo a la posición de cada termocuplas dispuestas según el arreglo experimental.

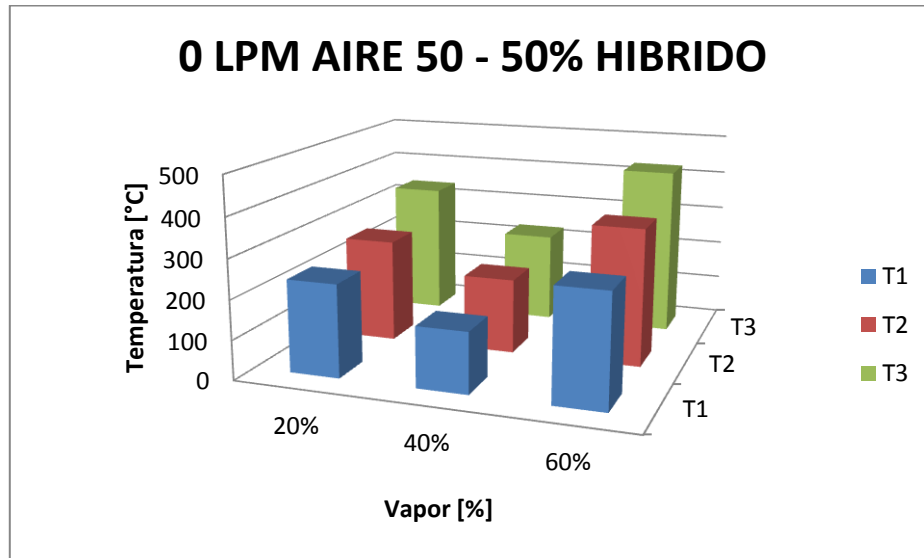


Gráfico 12. Distribución de temperaturas máximas para el conjunto 2 de ensayos.

5.2.3 Resultados espectrometría de rayos – X

En las tablas 19, 20 y 21 se presentan los resultados para los ensayos No.5 a No.7, el software utilizado (AMPTek DppMCA) entrega los valores de los conteos de fotones por segundos (CPS) en cada canal. Luego se calcula la intensidad relativa con respecto al peak de mayor intensidad.

Tabla 19. Resultados de espectrometría para ensayo No.5.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,32	2,31	0,43
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,69	7,74	1,46
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,50	7,03	1,32
V	K $\alpha_{1,2}$	4,87	6,65	1,25
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,39	3,89	0,73
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	6,34	1,19
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,64	531,80	100,00

Tabla 20. Resultados de espectrometría para ensayo No.6.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,40	3,22	0,69
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,71	5,11	1,10
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,49	12,28	2,65
V	K $\alpha_{1,2}$	4,85	2,66	0,57
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,39	6,76	1,46
Cu	K $\alpha_{1,2}$	7,99	4,43	0,95
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,56	464,11	100,00

Tabla 21. Resultados de espectrometría para ensayo No.7.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,35	0,68	0,11
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,76	7,06	1,16
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,54	8,43	1,38
V	K $\alpha_{1,2}$	4,90	7,59	1,25
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,44	6,17	1,01
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	3,34	0,55
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,66	609,12	100,00

5.2.4 Resultados cromatografía gaseosa

En la Tabla 22 se presentan los resultados de las muestras analizadas mediante cromatografía gaseosa.

Tabla 22. Resultados de cromatografía gaseosa conjunto 2.

Variables				Cromatografía gaseosa				
No. ensayo	Caudal Aire	Caudal Vapor	Hibrido	H ₂	CH ₄	CO ₂	CO	Syngas
-	[l/min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
5	-	20	50-50	0,00	0,00	1,36	0,00	0,00
6	-	40	50-50	0,00	0,00	4,22	0,00	0,00
7	-	60	50-50	0,00	0,00	2,67	0,00	0,00

5.2.5 Análisis de resultados conjunto 2

En los gráficos 9, 10 y 11 se presenta el comportamiento térmico del reactor cuando se opera sin inyección de aire y con relación híbrida 50-50%.

Para los tres ensayos de este conjunto no se observó la formación de un frente de combustión, de manera que el aumento gradual de temperaturas en las termocuplas luego de la inyección de la carga se explica mayormente a la transferencia de calor por conducción que se produce dentro del reactor desde el medio inerte a la carga híbrida, debido a las altas temperaturas (sobre 900 [°C]) que poseía éste antes de que se colocará la carga de NFU. Mediante una inspección visual del reactor se observa que la mayor parte del NFU no se gasifica, la sección más cercana al medio inerte (a partir de la termocupla 3) comienza a fundirse y a envolver las esferas de alúmina, además una pequeña porción de éste se encuentra en forma de polvillo en el material aislante interno del reactor.

Las temperaturas máximas registradas para los ensayos 4 y 5 no superan los 350 [°C], para el ensayo 6 se presentan temperaturas que en promedio son superiores a las de los ensayos anteriores, sin embargo al no permanecer ni altas ni constantes, no permiten iniciar la ignición sostenida de los neumáticos. Por otra parte se observa que el vapor inyectado transfiere calor a la carga híbrida, esto se observa por un descenso gradual de las temperaturas a partir de la termocupla No.4 la cual es la más próxima a la salida del vapor, se observa que a medida que se aumenta la cantidad de vapor el aumento gradual de temperatura de la carga híbrida se produce en menor tiempo, explicando las curvas más pronunciadas en los perfiles de temperatura al momento de

la inyección, luego el sistema alcanza el equilibrio térmico y al no ocurrir combustión el vapor es enfriado más rápidamente.

Las muestras analizadas por espectrometría de rayos – X presentan alto contenido de humedad como se puede ver en el Anexo C, esto debido a que no se produce la reacción completa de combustión y el vapor ingresa en cantidad considerable a los filtros de retención, las muestras nuevamente poseen como elemento predominante el Zinc, sin embargo no se puede concluir sobre la influencia de la inyección de vapor en la intensidad de este elemento pues los productos sólidos captados de la corriente de gas producida al momento de inyectar la carga de neumáticos no fue constante durante toda la experiencia y solo forma parte del calentamiento de los neumáticos al ser ingresados a altas temperaturas.

Los resultados de la cromatografía gaseosa muestran que no se genera gas de síntesis, se midió CO₂ en pequeñas porciones, esto como resultado de la pequeña emanación de gases que ocurre al momento de inyectar la carga híbrida.

5.3 CONJUNTO 3: ENSAYOS CON FLUJO DE VAPOR Y RELACIÓN HÍBRIDA 25-75%

5.3.1 Perfiles de temperaturas en función del tiempo.

Condiciones de operación:

- Flujo de Aire: 0 [l/min]
- Flujo de Vapor: 1,6(20%) – 3,2(40%) – 4,8(60%) [l/min]
- Relación Híbrida: 35 – 75 [%]
- Relación de equivalencia: 0 [-]

Gráfico 20% Vapor

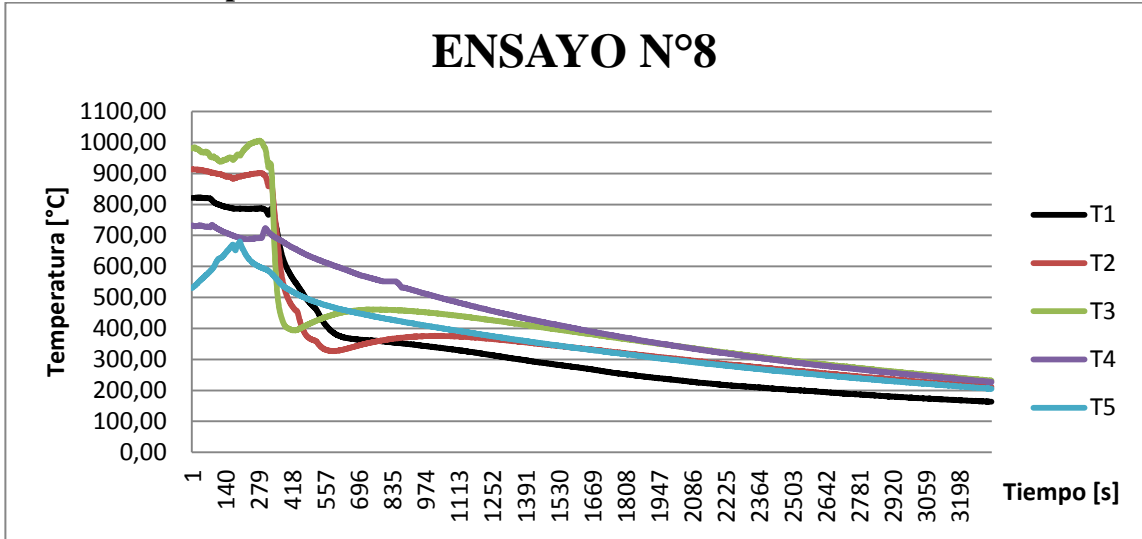


Gráfico 13. Perfil de temperatura para 20% Vapor, 0 LPM Aire, 25 -75% Hibrido.

Gráfico 40% Vapor

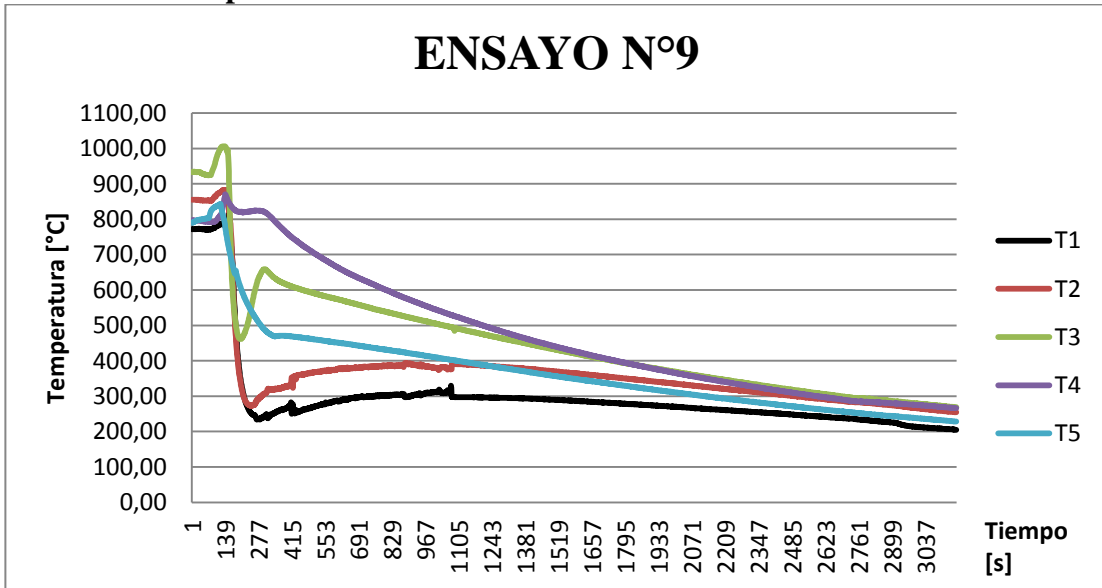


Gráfico 14. Perfil de temperatura para 40% Vapor, 0 LPM Aire, 25 -75% Hibrido.

Gráfico 60% Vapor

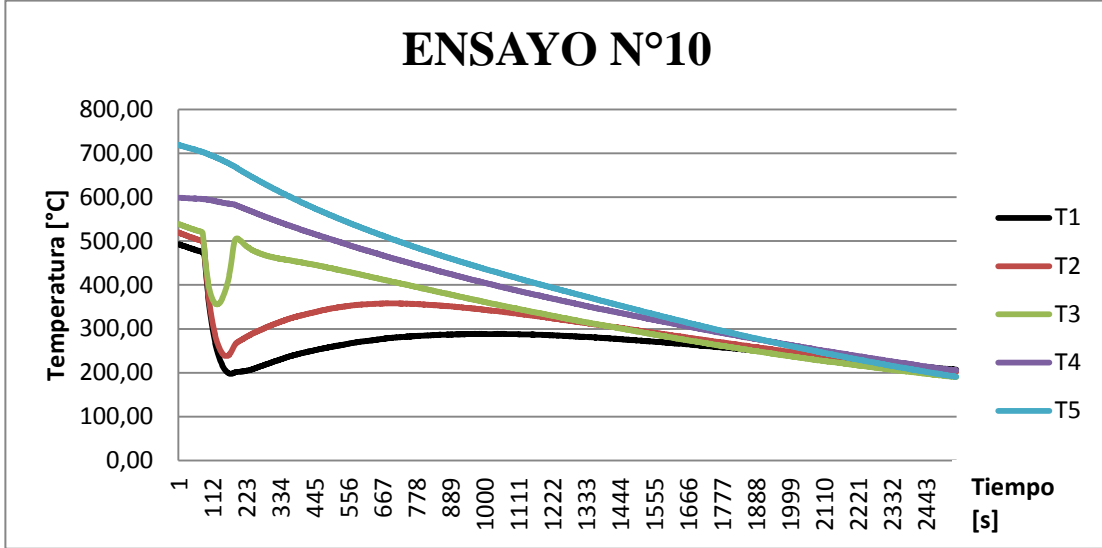


Gráfico 15. Perfil de temperatura para 60% Vapor, 0 LPM Aire, 25 –75% Híbrido.

5.3.2 Temperaturas máximas medidas

Se presentan los resultados para las temperaturas máximas promedio obtenidas en las tres termocuplas de interés.

Tabla 23. Temperaturas máximas y velocidad de propagación conjunto 3.

No.	Caudal Aire	Caudal Vapor	Híbrido	ϕ	Temperaturas máximas promedio	Velocidad de propagación
-	[l/min]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[cm/s]
8	-	20%	25-75	-	401,02	No hay frente
9	-	40%	25-75	-	458,83	No hay frente
10	-	60%	25-75	-	384,53	No hay frente

A continuación se presenta la distribución de temperaturas máximas registradas por las termocuplas para la zona de interés. Se indica de acuerdo a la posición de cada termocuplas dispuestas según el arreglo experimental.

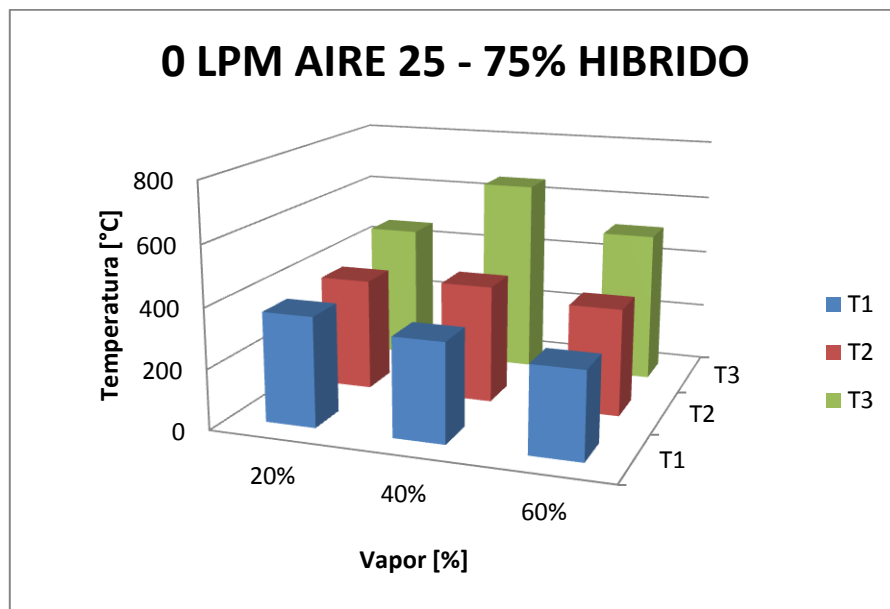


Gráfico 16. Distribución de temperaturas máximas para el conjunto 3 de ensayos.

5.3.3 Resultados espectrometría de rayos – X

En las Tablas 24, 25 y 26 se presentan los resultados para los ensayos No.8 a No.10, el software utilizado (AMPTek DppMCA) entrega los valores de los conteos de fotones por segundos (CPS) en cada canal. Luego se calcula la intensidad relativa con respecto al peak de mayor intensidad.

Tabla 24. Resultados de espectrometría para ensayo No.8.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,35	2,21	0,25
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,71	1,30	0,15
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,54	8,04	0,92
V	K $\alpha_{1,2}$	4,95	6,59	0,76
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,44	4,38	0,50
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	3,44	0,39
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,66	872,45	100,00

Tabla 25. Resultados de espectrometría para ensayo No.9.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,35	4,23	0,85
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,72	2,50	0,50
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,50	4,67	0,94
V	K $\alpha_{1,2}$	4,89	6,61	1,33
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,37	2,16	0,44
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	0,98	0,20
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,67	496,19	100,00

Tabla 26. Resultados de espectrometría para ensayo No.10.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,35	2,50	0,58
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,71	3,25	0,76
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,49	5,04	1,18
V	K $\alpha_{1,2}$	4,90	2,81	0,66
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,44	3,01	0,70
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	1,28	0,30
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,61	427,42	100,00

5.3.4 Resultados de cromatografía gaseosa

En la Tabla 27 se presentan los resultados de las muestras analizadas mediante cromatografía gaseosa.

Tabla 27. Resultados de cromatografía gaseosa conjunto 3 de ensayos.

No. ensayo	Variables			Cromatografía gaseosa				
	Caudal Aire	Caudal Vapor	Hibrido	H ₂	CH ₄	CO ₂	CO	Syngas
-	[l/min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
8	-	20	25-75	0,00	0,00	8,25	0,00	0,00
9	-	40	25-75	0,00	0,00	2,19	0,00	0,00
10	-	60	25-75	0,00	0,00	4,86	0,13	0,00

5.3.5 Análisis de resultados conjunto 3

Los gráficos 13, 14 y 15 presentan los perfiles de temperatura en función del tiempo para el conjunto de ensayos sin flujo de aire, con inyección de vapor para relaciones volumétricas de 25% medio inerte y 75% de neumáticos, de éstos se observa que no ocurre la combustión del combustible sólido y por ende no existe formación de frente de combustión. Para el ensayo con 20% de vapor no existe un aumento considerable de temperatura al momento de ingresar la carga en la termocupla No.3, no así en los ensayos con 40% y 60% en flujo de vapor, en donde se pueden observar peaks de temperaturas en la termocupla No.3 segundos después de ingresada la carga de neumáticos, sin embargo al no lograr combustionar, pierde temperatura rápidamente y el calor de ésta es transferida a zonas cercanas lo que se ve evidenciado en el aumento gradual de las termocuplas No.2 y No.1, los ensayos se realizaron durante un tiempo suficientemente largo como para lograr observar alguna variación de temperaturas o para concluir el enfriamiento del reactor. El gráfico 16 presenta la distribución de las temperaturas máximas alcanzadas por el reactor; como se puede observar los máximos valores de temperatura van descendiendo hacia la parte superior del reactor, encontrándose los máximos de temperaturas en la termocupla No.3 en los tres ensayos. Se observa además que a medida que se aumenta el porcentaje de vapor, la temperatura en las zonas cercanas a la inyección (termocuplas No.3 y No.4) es considerablemente mayor, alcanzando como máximo los 653 [°C], y en las zonas más alejadas del reactor, principalmente en la termocupla No.1, los máximos de temperaturas van disminuyendo, esto se explica debido a que el vapor suministrado en mayores caudales, enfría la carga rápidamente al no existir combustión dentro del reactor. Luego de finalizado el ensayo se hace el cambio de aislante interno y se realiza inspección visual del reactor, se observa que gran parte de la carga híbrida se encuentra entera, además se presenta en forma cristalizada en la parte superior, tal como se muestra en la Figura 15, el cual puede ser molido y transformado en polvo de neumático con muy poco esfuerzo, en las zonas inferiores el neumático se encuentra fundido a las esferas de alúmina.



Figura 15. Pellets de NFU cristalizados.

Las Tablas 24, 25 y 26 presentan los resultados de la espectrometría de rayos – X realizada a las tres muestras, se observa del ANEXO C, que la primera muestra se encuentra altamente saturada, debido a la mayor cantidad volumétrica de neumático en la carga híbrida lo que explicaría el aumento en la intensidad neta del Zinc para el primer ensayo, luego al aumentar el porcentaje de vapor disminuye la detección de Zinc en las muestras, también se encontró K, Ca, Ti, V, Fe, Cu al igual que en los demás conjuntos de ensayos con una intensidad neta mucho menor a la medida en comparación al Zinc. Para el polvillo de neumático se realiza un espectro el cual se encuentra adjunto en el ANEXO A.5.

Los resultados de la cromatografía gaseosa muestran que no existe formación de H_2 , sin embargo se presentan cantidades considerables de CO_2 el cual va descendiendo a medida que aumenta el porcentaje de vapor, se observa que comienzan a aparecer cantidades pequeñas de CO.

5.4 CONJUNTO 4: ENSAYOS CON FLUJO DE AIRE/VAPOR/GAS NATURAL Y RELACIÓN HÍBRIDA 50-50%

5.4.1 Perfiles de temperaturas en función del tiempo.

Las condiciones de operación son las siguientes:

- Flujo de Aire: 8 [l/min]

- Flujo de Vapor: 0 - 1,6(20%) - 3,2(40%) - 4,8(60%) [l/min]
- Relación Híbrida: 50 - 50 [%]
- Relación de equivalencia: 0,3 [-]

Gráfico 0% Vapor

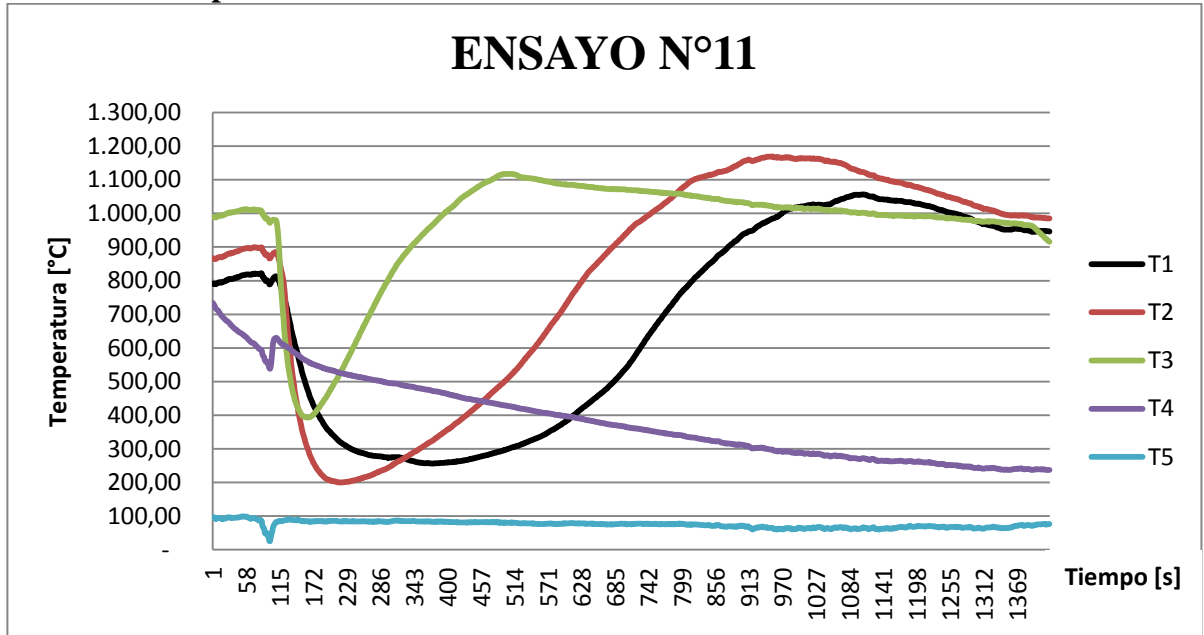


Gráfico 17. Perfil de temperatura para 0% Vapor, $\phi = 0,3$, 50 -50% Híbrido.

Gráfico 20% Vapor

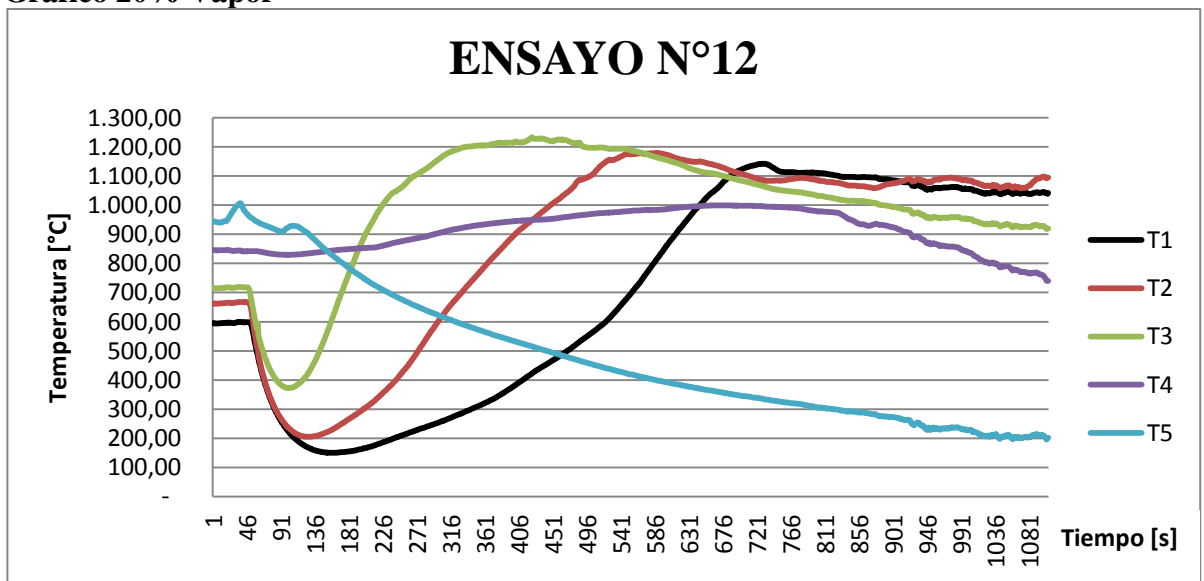


Gráfico 18. Perfil de temperatura para 20% Vapor, $\phi = 0,3$, 50 -50% Híbrido.

Gráfico 40% Vapor

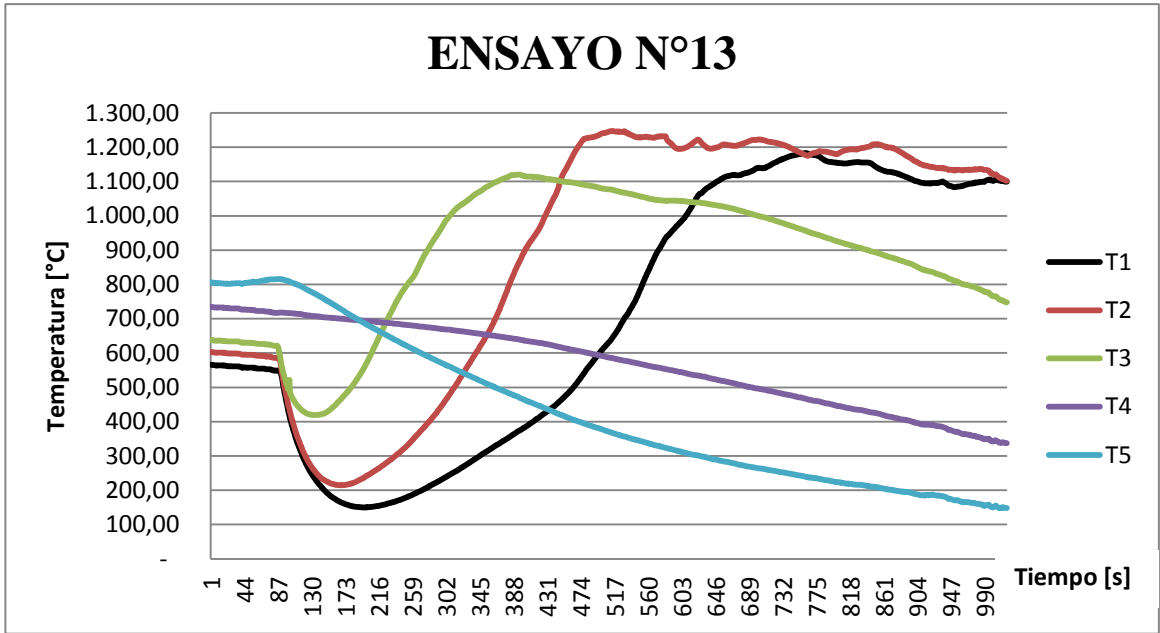


Gráfico 19. Perfil de temperatura para 40% Vapor, $\phi = 0,3, 50$ –50% Híbrido.

Gráfico 60% Vapor

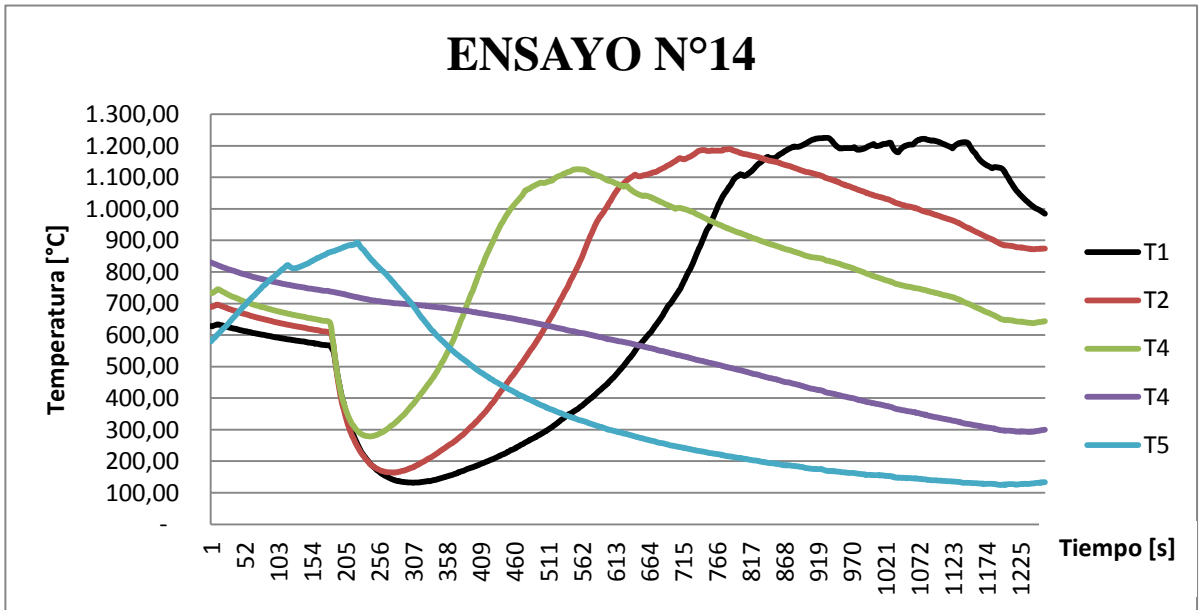


Gráfico 20. Perfil de temperatura para 60% Vapor, $\phi = 0,3, 50$ –50% Híbrido.

5.4.2 Temperaturas máximas y velocidad del frente de combustión

Se presentan los resultados para las temperaturas máximas obtenidas en las tres termocuplas de interés, también las velocidades promedio de propagación del frente de combustión.

Tabla 28. Temperaturas máximas y velocidad de propagación conjunto 4.

No.	Caudal Aire	Caudal Vapor	Hibrido	ϕ	Temperaturas máximas promedio	Velocidad de propagación
-	[l/min]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[cm/s]
11	8	0%	50-50	0,3	1114,64	0,017
12	8	20%	50-50	0,3	1184,52	0,026
13	8	40%	50-50	0,3	1183,62	0,025
14	8	60%	50-50	0,3	1180,16	0,022

A continuación se presentan la distribución de temperaturas máximas registradas por las tres termocuplas para la zona de interés.

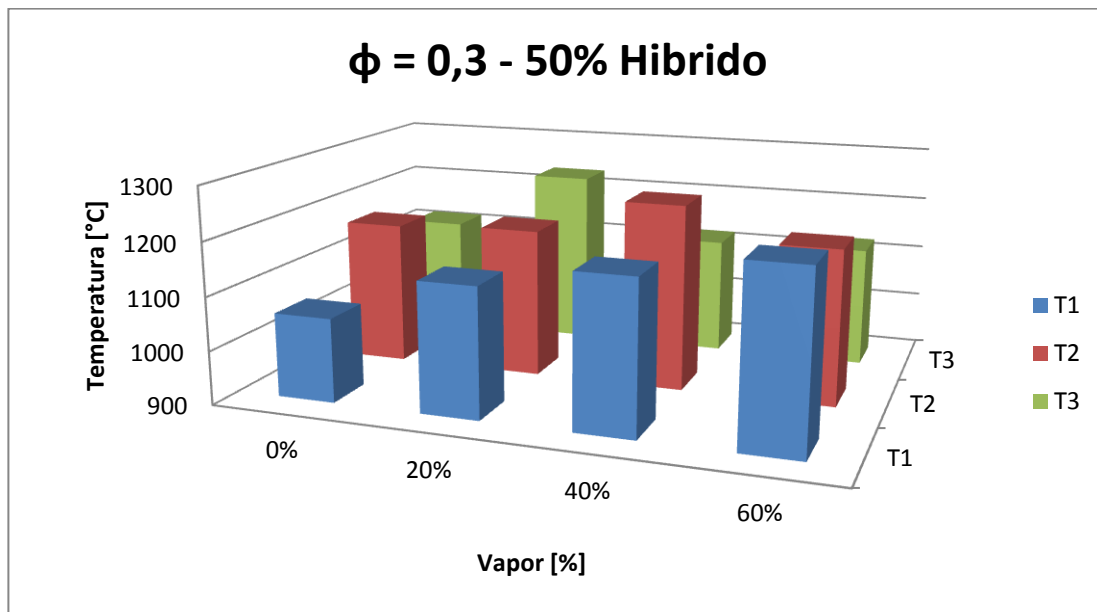


Gráfico 21. Distribución de temperaturas máximas para el conjunto 4 de ensayos.

5.4.3 Resultados espectrometría de rayos – X

En las Tablas 29, 30, 31 y 32 se presentan los resultados para los ensayos No.11 a No.14. Se calcula la intensidad relativa con respecto al peak de mayor intensidad.

Tabla 29. Resultados de espectrometría para ensayo No.11.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,37	3,28	0,87
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,73	5,33	1,42
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,55	12,68	3,37
V	K $\alpha_{1,2}$	4,91	8,57	2,28
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,45	5,50	1,46
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,09	1,58	0,42
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,66	375,80	100,00

Tabla 30. Resultados de espectrometría para ensayo No.12.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,37	2,63	0,86
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,78	2,36	0,77
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,55	11,90	3,87
V	K $\alpha_{1,2}$	4,96	2,48	0,81
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,45	3,77	1,23
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	3,32	1,08
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,66	307,43	100,00

Tabla 31. Resultados de espectrometría para ensayo No.13.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,37	4,44	1,25
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,73	3,30	0,93
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,55	6,03	1,70
V	K $\alpha_{1,2}$	4,91	2,24	0,63
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,45	2,07	0,58
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	1,36	0,38
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,66	354,44	100,00

Tabla 32. Resultados de espectrometría para ensayo No.14.

Elemento	Línea	Energía	Intensidad neta	Intensidad relativa
-	-	keV	Conteos/s	%
K	K $\alpha_{1,2}$	3,37	2,42	0,44
Ca	K $\alpha_{1,2}$	3,78	5,85	1,07
Ti	K $\alpha_{1,2}$	4,55	11,11	2,03
V	K $\alpha_{1,2}$	4,91	2,40	0,44
Fe	K $\alpha_{1,2}$	6,45	2,47	0,45
Cu	K $\alpha_{1,2}$	8,04	1,72	0,31
Zn	K $\alpha_{1,2}$	8,66	548,53	100,00

5.4.4 Resultados de cromatografía gaseosa

En la Tabla 33 se presentan los resultados de las muestras analizadas mediante cromatografía gaseosa.

Tabla 33. Resultados de cromatografía gaseosa conjunto 4 de ensayos.

Variables				Cromatografía gaseosa				
No.	Caudal Aire	Caudal Vapor	Hibrido	H ₂	CH ₄	CO ₂	CO	Syngas
-	[l/min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
11	7,74	0	50-50	2,65	0,00	5,05	0,69	3,34
12	7,74	20	50-50	2,08	0,00	1,49	1,91	3,99
13	7,74	40	50-50	0,59	0,30	2,32	1,59	1,18
14	7,74	60	50-50	0,49	0,00	2,34	1,53	2,02

5.4.5 Análisis de resultados conjunto 4

Los gráficos 17, 18, 19 y 20 presentan los perfiles de temperatura en función del tiempo para los ensayos con flujo de mezcla aire/gas natural e inyección de vapor, para relaciones volumétricas de 50 – 50 % en la carga híbrida. Al igual que en todos los ensayos anteriores se observa el descenso de temperaturas al momento de inyectar la carga, luego éstas comienzan a aumentar conforme pasa el tiempo y es posible observar la formación de un frente de combustión que avanza a medida que el combustible sólido se consume. Para este conjunto de ensayos al trabajar con gas natural, luego de gasificado el neumático, el reactor mantiene altas temperaturas, éste proceso se ve evidenciado en que los registros de temperaturas de las termocuplas

No.1 y No.2 no presentan descenso gradual de temperaturas, sino que tiende a ser más constante. En la Tabla 28 se presentan los valores máximos de temperatura registrados para las tres termocuplas que miden la zona híbrida, se observa que a excepción del Ensayo 12, los valores más altos se encuentran en las zonas donde se ubican las termocuplas No.1 y No.2, esto debido al reacomodamiento del material sólido en el reactor y el aumento gradual de temperaturas que se logra en esta zona. Además se presentan los valores promedios de la velocidad de propagación del frente de combustión, se observa que a medida que se aumenta el porcentaje de vapor ésta disminuye.

Para estos ensayos indicar el tiempo en que el neumático se consume en su totalidad resulta más complejo pues como se mencionó anteriormente, no se observan descensos graduales en cada termocupla luego de ocurrido un peak, sin embargo en base a observaciones realizadas empíricamente, específicamente en la salida del frente de combustión por la parte superior del reactor, la duración promedio de los ensayos se estima en 16 [min], por inspección interna se concluye que todo el material sólido se gasifica dentro del reactor.

Las tablas 29, 30, 31 y 32 presentan los resultados de la espectrometría de rayos – X realizada a las cuatro muestras, se observa del ANEXO C, que las muestras poseen un grado de saturación similar, el elemento que presenta mayor intensidad es el Zinc que a excepción del ensayo No.14 posee una intensidad relativamente constante. El otro elemento que se encuentra con una intensidad relativa sobre el 2% con respecto al Zinc, es el Titanio, luego los demás elementos como el K, Ca, V, Fe, Cu se encuentran en un porcentaje bajo en la muestra.

Los resultados de la cromatografía gaseosa muestran que existe formación de H_2 , CH_4 , CO_2 y CO . De estos resultados se observa que a medida que se aumenta el porcentaje de vapor, el porcentaje de H_2 y CO_2 disminuye, para el CO no se observan tendencias respecto al porcentaje de vapor. En un solo ensayo se obtuvo CH_4 cuyo porcentaje es bastante pequeño (menor al 1%).

5.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONJUNTO DE RESULTADOS

A continuación se presentan los análisis comparativos de las temperaturas máximas de combustión, velocidad de propagación del frente de llama, los productos de la combustión y los residuos sólidos detectados en los ensayos realizados.

5.5.1 Temperaturas máximas de combustión

El Gráfico 22 presenta los valores promedio de las temperaturas máximas para las tres termocuplas en la zona de interés, es decir, en la parte donde ocurre la combustión híbrida de NFU y alúmina, para los cuatro conjuntos de ensayo.

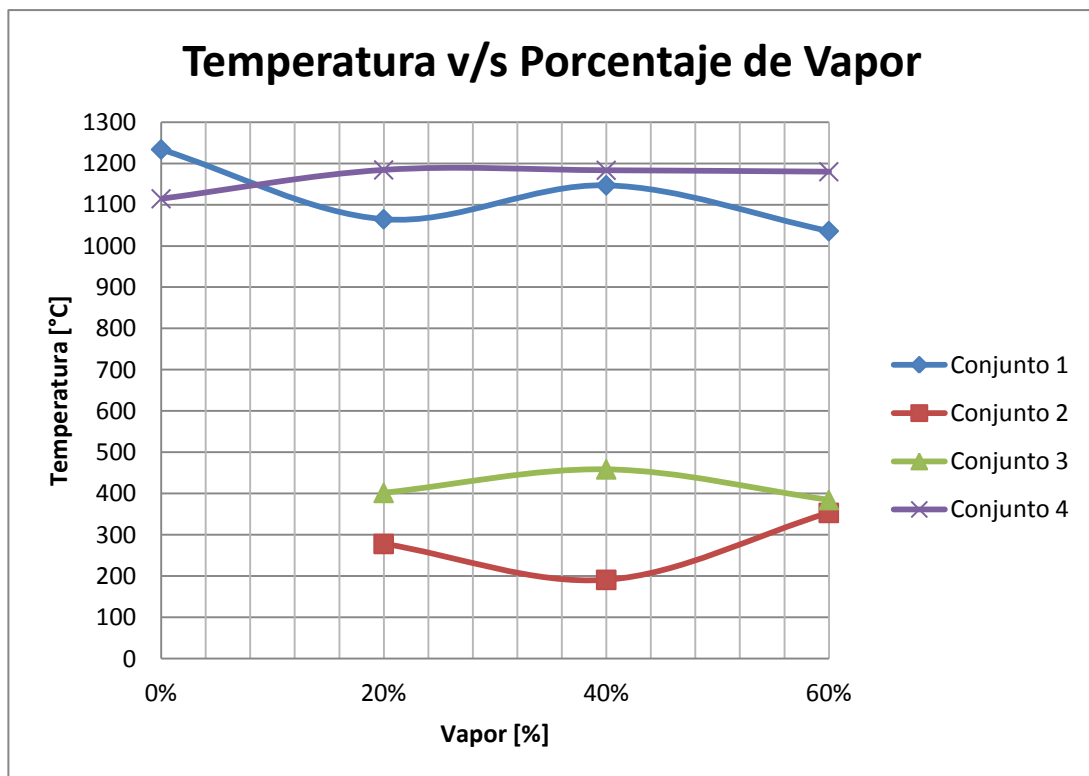


Gráfico 22. Resumen de temperaturas máximas de todos los conjuntos experimentales.

Se observa en primer lugar que para los conjuntos 1 y 4, los que poseen presencia de aire, las temperaturas máximas de combustión alcanzadas son considerablemente mayores a los ensayos en los que sólo se trabajó con vapor. Para el conjunto 1, donde se opera con una mezcla de aire y vapor como agentes gasificantes, el valor de

temperaturas máximas va descendiendo a medida que se aumenta el porcentaje de vapor. Para el conjunto 4 de ensayos donde se trabajo con aire, vapor y un pequeño caudal de gas natural se observa que las temperaturas tienden a ser bastante similares con diferencias de no más de 50 [°C] para todos los porcentajes de vapor. Las curvas para los conjuntos 1 y 4 tienden a ser diferentes, esto puede ser explicado considerando que en éste último conjunto el reactor puede sostener un frente de combustión más homogéneo debido a la combustión con gas natural cuyo flujo se mantiene constante a diferencia del conjunto 1 donde el único combustible disponible es el neumático, el cual se va consumiendo y reordenando dentro del reactor. Por último para ambos resultados, analizando las temperaturas alcanzadas y sus tendencias, se comprueba que el reactor sostiene una estabilidad en el proceso de gasificación cuando éste opera con aire a diferentes caudales de vapor y con inyección de gas natural.

Para los conjuntos 2 y 3, en donde se operó sin caudal de aire, se observa que las temperaturas máximas alcanzadas no superan los 400 [°C], punto menor a la auto ignición del neumático. Para el conjunto 3 en donde se trabajó con una proporción de neumáticos mayor, se observa que las temperaturas alcanzadas para los tres porcentajes de vapor tienden a ser similares, en el conjunto 2 de ensayos la tendencia tiende a ser mas curva, esto se explica debido que existe menor cantidad de neumáticos que permita aumentar la temperatura interna del reactor.

Finalmente en el ANEXO D se presenta esquemáticamente cómo avanza el frente de combustión con respecto a la posición longitudinal del reactor, para el ensayo No.1 que corresponde al punto operacional donde se alcanzó mayor temperatura.

5.5.2 Velocidad de propagación del frente de combustión

El gráfico 23 presenta las distintas velocidades de propagación del frente de combustión calculadas para los conjuntos de ensayo 1 (Aire) y 4 (GN-Aire), pues solo en estos se observó su formación. Con estos resultados se puede observar el

desplazamiento térmico en el reactor, además de clasificar el régimen de propagación de la llama que predomina en estos ensayos. De acuerdo a los resultados, en donde se tienen velocidades del orden de 10^{-4} [m/s] el régimen que predomina es la Baja Velocidad en reactores de MPI.

Para el conjunto en donde se trabajó con aire, se observa que el frente se mueve más rápido hasta alcanzar un máximo en 40% de vapor, para luego comenzar a descender. Para los ensayos con aire y gas natural, también se produce un aumento en la velocidad de propagación pero el máximo se encuentra en 20% para luego descender. Para el conjunto 4, se presentan valores de velocidad superiores a los con solo aire (conjunto 1). En primer lugar, se esperaría que el contenido de oxígeno en las mezclas gaseosas con una determinada velocidad de filtración, produzcan un aumento en la velocidad de propagación del frente, esto ocurre en principio, pero se alcanzan valores máximos para determinados puntos de vapor. Por otra parte, se presentan comportamientos distintos en la forma y los valores de la velocidad de propagación del frente, para los ensayos en donde se trabaja con combustible sólido (NFU) y combustible gaseoso (GN), se observa que a partir de 20% de vapor, las diferencias entre los valores de velocidad son muy pequeñas, además se aumentó el rango del gráfico para mostrar que existen otros regímenes de propagación cuyas velocidades son mayores. Se concluye que el desplazamiento térmico dentro del reactor es bastante uniforme para todos los conjuntos experimentales.

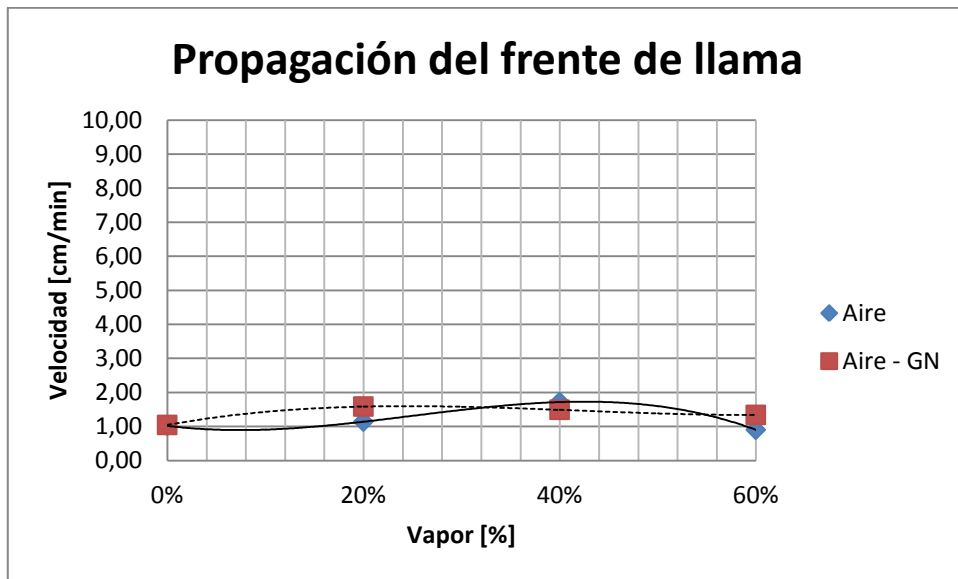


Gráfico 23. Velocidades del frente de combustión para los conjuntos experimentales.

5.5.3 Productos de la combustión

Los gráficos 24, 25 y 26 presentan las concentraciones de H_2 , CO y CO_2 producto de los procesos de gasificación para todos los ensayos realizados.

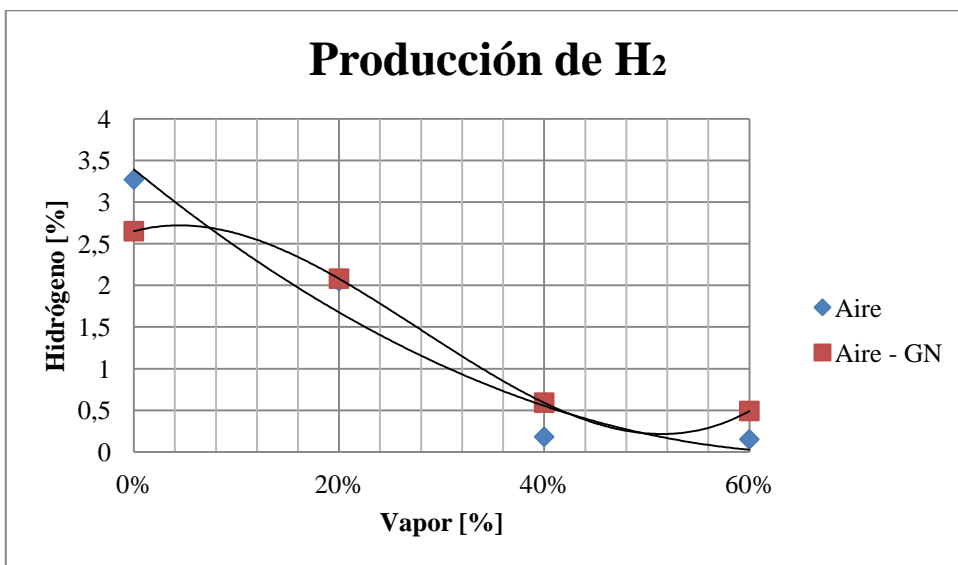


Gráfico 24. Producción de H_2 .

Durante el desarrollo de los ensayos se observó que la formación de H_2 , es máxima cuando se trabaja sin inyección de vapor, en específico se obtuvo una concentración

máxima de 3,27% de H₂ para el ensayo en donde se trabajó solamente con flujo de aire. Además se ve una tendencia clara en la disminución de las concentraciones cuando el porcentaje de vapor aumenta. En el ANEXO C se realiza una estimación de la relación de equivalencia para los ensayos en donde se trabaja sólo con neumáticos, sin inyección de gas natural (puntos azules Gráfico 24), se observa que para porcentajes menores o iguales a 20% se opera con relación de equivalencia ultra-rica, para porcentajes mayores, la relación de equivalencia se acerca cada vez más a la relación estequiométrica. Es posible que sea necesario variar las relaciones volumétricas O₂/H₂O para comprobar si mediante otros puntos operacionales la concentración de H₂ tiende a aumentar o a disminuir.

Para los ensayos donde se trabaja con gas natural, se hace más difícil calcular la relación de equivalencia con la cual se opera, pues existe una interacción entre el combustible gaseoso y el sólido, sin embargo se observa una tendencia similar a la disminución en la producción de H₂. Los resultados evidenciarían un predominio de las reacciones exotérmicas con oxígeno, subordinando aquellas endotérmicas que involucran al vapor de agua, dando como resultado una menor formación de H₂.

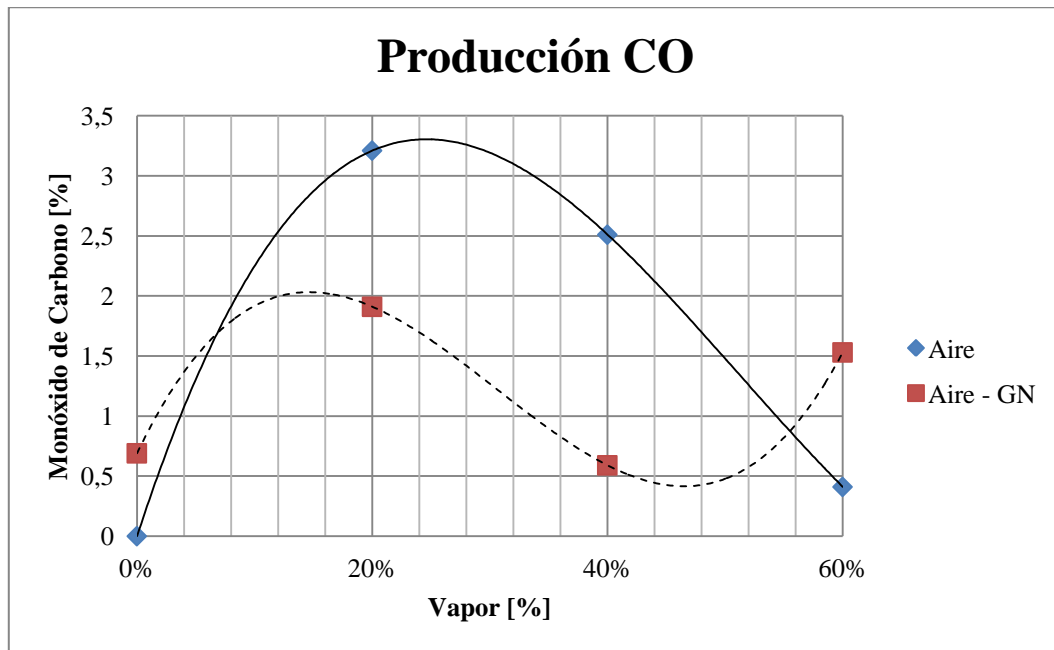


Gráfico 25. Producción de CO.

Con respecto a la formación de CO, se observa que hubo formación para los conjuntos donde se trabaja con aire, además las concentraciones son mayores cuando se trabaja sin inyección de gas natural. Existe una tendencia al aumento en la producción de CO al aumentar el porcentaje de vapor alcanzándose un máximo para 20% en ambos tipos de ensayos, luego ésta comienza a descender. Para los ensayos solo con inyección de aire, se obtuvieron temperaturas mayores que para aquellos con flujo de aire – gas natural, lo que explicaría el aumento en las concentraciones de CO, verificándose lo mencionado en [16]. Para mezclas aire - gas natural se observa un comportamiento similar, sin embargo en 40% existe un descenso abrupto en la tendencia de concentración de CO, para esto se debe considerar la influencia de factores externos que pueden influir en la obtención de concentraciones tan pequeñas, luego para valores superiores se observa mayor concentración de CO pero no mayor a la registrada para 20% de vapor.

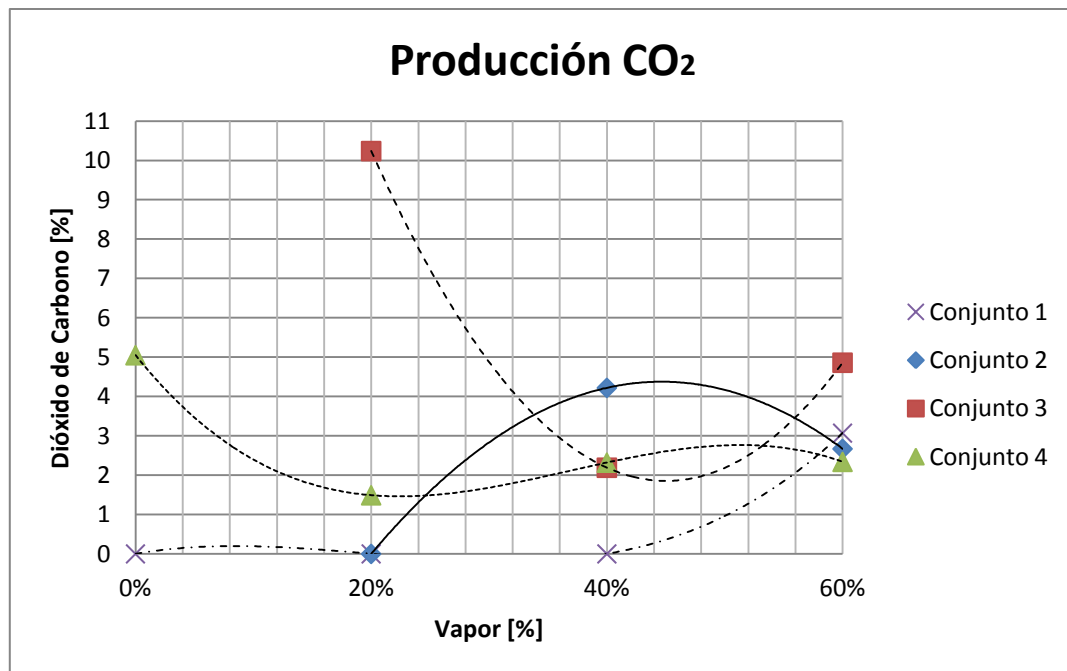


Gráfico 26. Producción de CO₂.

El Gráfico 26 presenta la formación de CO₂ para todos los conjuntos de ensayos, se observó la presencia de éste en todos los ensayos (con y sin aire). Para los ensayos donde se trabajó con flujo de aire – vapor (Conjunto 1), se observa que la formación

de CO₂ es nula hasta 40% de vapor, luego hay presencia producto de la disminución en la temperatura interna del reactor, lo que causaría una disminución de gases producto de la gasificación como el CO, dando paso a la generación de CO₂. Los resultados de concentración de CO₂, para los conjuntos 2 y 3 forman parte del proceso de combustión del neumático solo con vapor de agua como agente oxidante, resultando en la generación de CO₂. La tendencia en la formación se explicaría por las temperaturas de combustión alcanzadas durante el calentamiento del neumático al ser inyectado al reactor precalentado y al momento en donde se toma la muestra, la cual se realiza durante los instantes en donde hay generación de gases de escape. Para el conjunto 3 de ensayos, en donde se utilizó una mayor proporción volumétrica en la cantidad de combustible, se observa un aumento en la concentración de CO₂ con un máximo de 10%. El conjunto 4 de ensayos donde se trabaja con flujo de aire, vapor y gas natural, presenta una formación máxima cuando se opera sin flujo de vapor, luego el aumento de éste presenta una disminución en la concentración de CO₂, la cual se mantiene relativamente constante en un 2%.

5.5.4 Captación de residuos sólidos

Como se pudo observar de los resultados de espectrometría de rayos – X, en específico de las intensidades medidas, el neumático cuando es sometido a procesos térmicos es una fuente de emisión considerable de distintos metales, sobre todo de Zinc y Fe. En el ANEXO A, se presentan los espectros para la caracterización química de los componentes que formaron parte del trabajo de laboratorio, como por ejemplo el papel filtro, el aislante térmico y los pellets de neumático. De esta forma se pueden clasificar las fuentes de origen de los elementos que forman parte de los residuos sólidos captados durante los ensayos.

En la Tabla 34 se presenta un resumen de la composición elemental detectada de los diversos componentes utilizados. El principal punto de atención se realiza en la captación y saturación de elementos en el papel filtro (P.F.S), esta columna se descompone en dos, pues hubo un ensayo que se realizó mediante TXRF (Espectrometría de Rayos X con reflexión Total), gracias al apoyo docente de la

Universidad de Concepción, esta técnica tiene como principal ventaja, sobre la XRF convencional, que debido a la configuración geométrica del rayo incidente se reducen de manera drásticas las contribuciones del fondo espectral, conocidas como “*background contributions*” mediante la eliminación de la dispersión de la muestra resultando en un aumento en la sensibilidad de la medición elemental.

Tabla 34. Resumen de elementos medidos para todos los tipos de muestra.

Elemento	N.F.U	A.T.C	P.F.L	P.F.S ^a	P.F.S ^b	P.NFU
K	N.D	D	D	D	D	D
Ca	N.D	D	D	D	D	D
Ti	N.D	D	D	D	D	D
V	N.D	D	D	D	D	N.D
Cr	D	N.D	D	N.D	D	D
Mn	N.D	D	D	N.D	D	N.D
Fe	D	D	D	D	D	D
Co	D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Cu	D	D	D	D	N.D	D
Zn	D	N.D	D	D	D	D
Rb	N.D	N.D	N.D	N.D	D	D
Sr	N.D	D	D	N.D	D	D
Zr	N.D	D	D	N.D	N.D	D
Ba	N.D	N.D	N.D	N.D	D	N.D
Pb	N.D	N.D	N.D	N.D	D	D

D: Detectado

a: XRF

ND: No detectado

b: TXRF

N.F.U: Neumático Fuera de Uso

A.T.C: Aislante cerámico térmico

P.F.L: Papel filtro limpio

P.F.S: Papel filtro saturado

P.NFU: Polvo de NFU

De la tabla se puede observar que existe una gran cantidad de elementos que son expulsados en la corriente de gas producto de la gasificación del neumático y que fueron capturados por el papel filtro. De la muestra original de neumático antes de ser sometido a cualquier proceso térmico se aprecia que no hay detección de K, Ca, Ti, V, Mn, Rb, Sr, Zr, Ba y Pb. De la muestra de polvo de neumático los elementos que coinciden con la muestra de papel filtro son: K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Sr

y Pb, de manera que se concluye que estos productos forman parte de la emisión de productos volátiles cuya fuente es el neumático, este resultado concuerda con el encontrado en [41] [42]. Con respecto al Ba, es posible que su fuente también sea el neumático pues se detectó mediante TXRF, la incerteza se fundamenta en que la muestra del polvillo se realiza mediante XRF y no por TXRF. El caso del Zr se explica debido al desprendimiento del material térmico cerámico que se junta con la muestra del polvillo de neumático. El Co detectado en la muestra de neumático no fue observado en ninguna otra muestra realizada, no obstante éste elemento se puede encontrar como sulfato de cobalto el cual se usa como elemento de adhesión en la fabricación del neumático [43].

6. ESCALAMIENTO DEL REACTOR.

En esta sección se presenta el análisis de las variables relevantes para el escalamiento y fabricación de un equipo para una planta piloto. En primer lugar se introduce el producto comercial que será valorado del proceso de gasificación, además de describir las variables relevantes para el escalamiento. Luego se resumen los costos de otras alternativas que se desarrollan en el país para la disposición final del neumático y finalmente se compara con la alternativa de usar un reactor de medio poroso para la eliminación de éste residuo. Todos los valores en dinero expuestos están en dólares norteamericanos utilizando la conversión de 1 US\$ igual a 500 pesos chilenos.

6.1 PRODUCTO COMERCIAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DEL NEUMÁTICO

Como se observó de los resultados experimentales, la combustión en medios porosos, utilizando mezclas ultra ricas de un hidrocarburo como el NFU logra ser una tecnología capaz de producir gases combustibles como el hidrógeno, logrando además altos rendimientos en la disminución de los volúmenes de este residuo.

A continuación se presenta una estimación del volumen de hidrógeno generado a partir de los volúmenes de neumáticos utilizados, esta estimación sirve como primer

lineamiento en la determinación de las variables de diseño del proceso de escalamiento.

6.1.1 Estimación de la producción de hidrógeno en el laboratorio.

El cálculo se realiza considerando el ensayo donde se logró la mayor generación de hidrógeno de acuerdo a la cromatografía gaseosa de la muestra de gas analizada.

SUPUESTOS Y VARIABLES DEL CÁLCULO

- Volumen de inyección de muestra de gas (2,5 ml jeringa) : $2,5 \times 10^{-6}$ [m³]
- Densidad del gas H₂ a 25[°C] :0,0852 [kg/m³]
- Densidad del gas N₂ a 25 [°C] :1,1848 [kg/m³]
- Volumen de neumático inyectado : 7×10^{-5} [m³]
- Masa de neumático inyectado :0,034 [kg]
- Se considera que la corriente de gases combustibles que lleva el H₂, tiene densidad similar a la del N₂, pues es el compuesto con mayor fracción volumétrica cuando se obtiene la cromatografía gaseosa.

CÁLCULO DEL VOLUMEN TOTAL DE GAS OBTENIDO DEL NFU

De acuerdo al principio de conservación de masa se tiene que la masa de combustible que se gasifica dentro del reactor es igual a la masa de la corriente de gas, considerando la porción de material volátil (porción que, excluyendo el vapor de agua, se desprende en forma de gas cuando el combustible es calentado), se tiene que:

$$m_{NFU} = m_{g,e}$$

De aquí

$$V_{NFU} * \rho_{NFU} = V_{g,e} * \rho_{g,e}$$

Despejando para volumen total de gases combustible se tiene:

$$V_{g,e} = \frac{V_{NFU} * \rho_{NFU}}{\rho_{g,e}} = \frac{7 \times 10^{-5} * 460}{1,1848} = 0,027 [m^3]$$

Y considerando solo material volátil (67%)

$$V_{g,e} = 0,027 * 0,67 = 0,018 [m^3]$$

Por lo tanto se tiene un volumen de gases de escape de aproximadamente 0,018 [m³] cuando se gasifican 0,034 [kg] de neumático, considerando su densidad similar a la del N₂

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE HIDRÓGENO OBTENIDO EN CROMATOGRAFÍA GASEOSA

La Tabla 35 presenta las transformaciones que se utilizan para llegar al volumen teórico de hidrógeno a partir de la inyección de 2,5 [ml] de la mezcla de gas calculado anteriormente en jeringa milimétrica.

El volumen de hidrógeno se calcula como:

$$V_{H_2} = \% \text{Volumen de cromatografía gaseosa} * 2,5 \times 10^{-6} [m^3]$$

Tabla 35. Volumen de H₂, punto óptimo de operación.

N° Ensayo	Relación de Equivalencia	Volumen de H ₂	Volumen de H ₂
-	φ	[%]	[m ³]
1	2,47	3,27	8,18E-08

CÁLCULO DE VOLUMEN DE HIDRÓGENO PRODUCIDO PARA PUNTO ÓPTIMO

El volumen total de H₂ producido a partir del volumen de NFU inyectado se estima como:

$$V_{T,H_2} = \frac{V_{g,e} * V_{H_2}}{2,5 \times 10^{-6}} = \frac{0,018 * 8,18 \times 10^{-8}}{2,5 \times 10^{-6}} = 5,89 \times 10^{-4} [m^3]$$

Por lo tanto se concluye que por cada 0,034 [kg] de NFU gasificado se obtienen aproximadamente $5,89 \times 10^{-4} [\text{m}^3]$ ó 588,9 [ml] de H_2 , y para cálculos posteriores se tienen aproximadamente 17,32 $[\text{m}^3]$ de H_2 por tonelada de neumático.

6.1.2 Estudio del valor comercial del hidrógeno

Como una combinación de dos átomos de hidrógenos, la molécula biatómica de hidrogeno (H_2) es un combustible único. Gracias a este se ha logrado impulsar la carrera espacial debido a su baja densidad, y su alta capacidad de energía por unidad de masa. Otra de sus características, son las bajas emisiones de contaminantes cuando es sometido a procesos de combustión, es por esto que el H_2 es el combustible del futuro. En las últimas décadas han surgido una gran variedad de empresas que se han dedicado a buscar aplicaciones de éste. Las investigaciones se han concentrado en generación, purificación y estrategias de almacenamiento, encontrándose que la oxidación parcial de combustibles pesados es la principal fuente de hidrógeno industrial debido a sus factores económicos [46]. La producción de hidrógeno es una gran y creciente industria, alrededor del mundo casi 57 millones de toneladas métricas de hidrogeno fueron producidas el 2004, con una tasa de crecimiento de 10% por año, sus usos se dividen en dos grandes grupos: la primera mitad es usado en el proceso “Haber” para producir amoniaco (NH_3), el cual es usado directa o indirectamente como fertilizante. La otra mitad de la producción de hidrogeno total es usada para convertir fuentes de petróleo pesado en fracciones más ligeras adecuándolas como combustibles, proceso conocido como “*hydrocracking*” [47]. También es usado en programas espaciales de la NASA como combustible para los transbordadores espaciales, y en celdas de combustible para producir calor, electricidad y agua bebestible para los astronautas. Las celdas de combustibles son dispositivos que convierten directamente el hidrógeno en electricidad [48].

El valor comercial del hidrógeno extra-puro en cilindros de 7,5 $[\text{m}^3]$ es de US\$22,25 por metro cúbico, con grado de pureza de 99,995% < 5 [ppm] H_2O y < 7 [ppm] O_2 . [49].

6.2 COSTOS DE ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE NFU

En este punto se exponen los resultados del análisis de la evaluación económica, en específico los costos económicos incurridos en la reutilización de los NFU en Chile de acuerdo a lo propuesto en [3]. En primer lugar, considerando el diagnóstico nacional y asumiendo que existe un porcentaje muy bajo de reutilización y valorización comercial del NFU en nuestro país se determinan los siguientes escenarios, metas de recuperación y destinos de los residuos para la evaluación de los impactos indicados en la Tabla 36.

Tabla 36. Metas de recuperación y destinos de NFU por escenario [3].

Ítem	Escenario 1		Escenario 2	
	Meta 2015	Meta 2020	Meta 2015	Meta 2020
Meta de recuperación (%)	40%	60%	50%	80%
Cantidades de NFU recogidos (toneladas)	26.000	48.000	33.000	64.000
Cantidades de NFU recogidos (N°)	1.465.000	2.673.000	1.831.000	3.565.000
Destinos proyectados (toneladas)	Valorización energética en cementeras: 5.200 toneladas	Valorización energética en cementeras: 9.600 toneladas	Valorización energética en cementeras: 6.600 toneladas	Valorización energética en cementeras: 12.800 toneladas
	Uso de NFU en infraestructura: 1.300 toneladas	Uso de NFU en infraestructura: 2.400 toneladas	Uso de NFU en infraestructura: 1.650 toneladas	Uso de NFU en infraestructura: 3.200 toneladas
	Trituración NFU: 19.500 toneladas (3 líneas de producción en 2 plantas)	Trituración NFU: 36.000 toneladas (5 líneas de producción en 3 plantas)	Trituración NFU: 24.750 toneladas (4 líneas de producción en 2 plantas)	Trituración NFU: 48.000 toneladas (7 líneas de producción en 4 plantas)

Conforme a estos escenarios [3] se pretende disminuir el destino desconocido del NFU de un 85% a un 40% en el escenario 1 (año 2020) y a un 20% en el escenario 2 (año 2020). Además se recuperarían una cantidad considerable de materia prima secundaria como acero y gránulo de caucho, que pueden formar parte de un nuevo mercado de materias primas. La Tabla 37 presentan las cantidades que se propone recuperar.

Tabla 37. Recuperación de materia prima secundaria de NFU [3].

NFU	Escenario 1		Escenario 2	
	2015	2020	2015	2020
Trituración (toneladas)	19.500	36.000	24.750	48.000
Acero recuperado (toneladas)	3.315	6.120	4.208	8.160
Grano caucho recuperado (toneladas)	13.650	25.200	17.325	33.600
Scrap (toneladas)	2.535	4.680	3.218	6.240

De acuerdo a los escenarios propuestos anteriormente la evaluación económica se realiza en base a los siguientes supuestos [3]:

- No se cobra ni se paga al generador de residuos al momento de recibir el NFU.
- La evaluación se realiza a partir de las condiciones nuevas que se imponen: A parte del sistema de recogida, acopio y transporte, sólo se consideran impactos asociados a la trituración, en cuanto a la valorización en la planta cementara es un destino activo que no requiere inversiones adicionales y tiene incorporados sus costos de operación.
- Costos de transporte: Los flujos de transporte se basan en camiones con capacidades de transportar 420 neumáticos; el costo de transporte asociado es de US\$36/tonelada en un radio de 150 [km], de US\$73 entre 150 a 500 [km] y de US\$127/tonelada en un radio mayor a 500 [km]. A esto se agrega el costo de transporte de materias primas secundarias de US\$18/tonelada.
- Costo de acopio promedio: US\$18/tonelada.

- Costo de disposición de residuos en planta de trituración: US\$5/tonelada procesada de NFU.
- Comercialización de materia prima secundaria: Gránulo de caucho US\$350/tonelada y acero US\$550/tonelada.

Basado en lo anterior y considerando la generación de los distintos empleos (251 en escenario 1 y 329 en escenario 2) relacionados con el transporte, centros de acopio, personal de planta de trituración y municipal se determinaron los siguientes costos para las plantas de trituración [3]:

- Escenario 1: La inversión requerida al 2015 para las 3 líneas de producción es de US\$7,4 millones, incluido el terreno asociado. La inversión al 2020 supone mayores requerimientos en terreno y línea de proceso, incrementándose a un total de US\$12 millones para las 5 líneas de producción.
- Escenario 2: La inversión requerida al 2015 es de US\$9,37 millones, y se incrementa al 2020 a un total de US\$16,77 millones, para contar con las 7 líneas de producción.
- Para ambos escenarios, los costos de operación unitarios del proceso de trituración ascienden a alrededor de US\$247 por tonelada, considerando 3 turnos y uno de ellos de mantención operativa.
- Los costos de transporte y acopio asciende en conjunto a US\$73 por tonelada en el escenario 1, lo que incluye además el costo asociado al transporte de los productos obtenidos. En el escenario 2, estos costos aumentan a US\$78 por tonelada, dado que se requiere recorrer mayores distancias para cumplir con las metas especificadas en la Tabla 36.

Los resultados de la evaluación económica consideran los valores de comercialización actuales del gránulo de caucho y acero, reportando un margen de operación resultante en ambos escenarios de alrededor de US\$60 por tonelada, obteniéndose una rentabilidad económica de 16% anual al 2015 y mayor al 17% al 2020 [3].

Dentro de los usos que tiene el gránulo de caucho en nuestro país se tienen:

- Área Deportiva: Rellenos para canchas de césped artificial en deportes como el fútbol, rugby, hockey, golf, también se ha comenzado a utilizar como sustituto del “rekortan” (pistas de atletismo) y como piso para multi-canchas.
- Recreación: Palmetas de seguridad o pisos continuos especialmente para niños, por ejemplo en jardines infantiles
- Decoración: El caucho pintado se usa como sustituto de la corteza de árbol para decorar jardines, rotondas y plazas.
- Construcción: Como aislante térmico y auditivo en las paredes de construcción de edificios y casas y como mezcla con el asfalto para la pavimentación de caminos y carreteras.
- Ganadera: Se utiliza como piso para animales en pistas de equitación y establos, pues evita el polvo en suspensión, además como camas para vacunos, las cuales se rellenan con caucho reciclado y así el animal pueda descansar y mejorar su producción de leche.

6.3 ALTERNATIVAS SIMILARES EN LA GASIFICACIÓN DE NEUMÁTICOS

Se puede estimar los ingresos brutos de la gasificación de neumáticos triturados para la co-producción de combustibles sintéticos, electricidad y calor para procesos. La Tabla 38 muestra un estimado de los ingresos brutos obtenidos de la gasificación del NFU, el que asciende a un total de US\$2,63 por neumático, lo que comprende ingresos por US\$1,88 de la venta de combustible diesel sintético, US\$0,34 por la venta de electricidad, US\$0,25 de la venta de calor para procesos a un costo de energía equivalente al del gas natural y US\$0,16 de la venta de acero por cada neumático. Esta estimación puede ser usada para extrapolar los ingresos brutos para una hipotética planta gasificadora que procesa 5 millones de NFU por año. La Tabla 38 también presenta que esta planta podría esperar tener un ingreso bruto de US\$ 13,16 millones por año, de las ventas combinadas de US\$9,4 millones de combustible

diesel sintético, US\$1,25 millones por la venta de calor para procesos a un valor equivalente al del gas natural, US\$1,72 millones de la venta de electricidad off-peak y US\$0,8 millones de la venta de acero recuperado [50].

Tabla 38. Ingresos brutos estimados de la gasificación de NFU [50].

Ítem	Combustible Diesel	Gas Natural*	Electricidad	
Eficiencia de Conversión	50%	12%	16%	Acero por neumático
Ingresos US\$/neumático	\$1,88	\$0,25	\$0,34	\$0,16
Distribución de ingresos estimados de una planta gasificadora				
Millones de US\$ por año				
5 millones de neumáticos/año	\$9,41	\$1,25	\$1,72	\$0,78

*Calor para procesos con costo equivalente al del gas natural.

En la Tabla 39 se presentan los costos de capital y operacionales para procesos de gasificación. La cual se ha normalizado para obtener los costos por unidad de entrada de neumático (US\$/TPA) y generación de electricidad (US\$/kWe).

Tabla 39. Estimación de costos de capital, de operación y mantención (O&M) para gasificación de NFU [50].

Tipo de gasificador	Tasa de alimentación de la planta	Tamaño de planta	Costos de capital	Tamaño Planta	Costos de capital US\$/kWe	Costos por O&M	Costos operacionales totales
-	[Miles de TPA]	[kW térmico]	[US\$/TPA]	[kW eléctrico]	[US\$/kWe]	[% Costo de Capital]	[US\$/tonelada]
IGCC	0,233	289966	732	74500	2290,9	2,5	18,3
IGCC	0,239	154048	650,2	47000	1713,5	2,5	48
Min	0,072	89552	620,8	30000	1853	2,5	19,3
Max	0,072	89552	828,1	30000	2472,1	2,5	25,8
Escala pequeña	0,03	24069	750	8063	2238,8	2,5	15
Escala pequeña	0,03	24069	720	8063	2148,3	2,5	14,4
Mediano	0,1	80230	690	26877	2059,7	2,5	13,8

6.4 VARIABLES PARA EL DISEÑO DEL REACTOR

El parámetro de diseño y operación más relevante que se debe considerar en el uso de los reactores de medio poroso inerte para la producción de hidrógeno es la velocidad de filtración, la cual representa la velocidad de la mezcla de gas al interior del medio poroso. Algunos autores [44] mencionan que independiente del material poroso usado en la zona de reacción, el grado de conversión y el rendimiento en la producción de hidrógeno, aumenta, cuando se aumenta la razón del flujo másico. Esto es debido al hecho que el aumento de energía que está siendo liberada por los reactantes por unidad de volumen en el reactor será mayor para tasas de flujo mayores. Esto resulta en niveles de temperatura superiores en el reactor que en el caso de tasas de flujos menores. La velocidad aproximada de filtración al interior de un reactor MPI viene dada por [45]:

$$u_f = \frac{\dot{V}_T}{15000 * \varepsilon * \pi * D^2} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Donde \dot{V}_T corresponde al volumen total de la mezcla de gases al interior del reactor en litros por minuto, ε es la porosidad de la matriz porosa y D es el diámetro al interior del reactor en metros.

Se supone que la velocidad de filtración para gasificar un kilogramo de NFU, se debe mantener constante para el equipo escalado.

La velocidad con la cual se trabajó en el laboratorio es la siguiente:

$$u_f = \frac{8}{15000 * 0,4 * \pi * 0,0372^2} = 0,31 \left[\frac{m}{s} \right]$$

En cuanto a los parámetros físicos utilizados para el punto de mayor generación de hidrógeno en el laboratorio se tienen:

- Temperatura de operación : Sobre los 1200 [°C]
- Presión de operación : 1,01 [bar]

- Caudal volumétrico de aire : 8 [litros/minuto]
- Masa de NFU : 0,034 [kg]
- Relación de equivalencia : 2,5 [-]
- Porosidad : 0,4 [-]
- Diámetro interior del reactor : 37,2 [mm]

Luego se determina el volumen total de la carga híbrida para calcular la geometría del reactor, considerando que la velocidad de filtración se mantiene constante, por lo tanto, el diámetro, la porosidad y el caudal volumétrico de aire no varían. Además al cambiar el caudal volumétrico de aire la relación de equivalencia, cambia y se pierden los parámetros obtenidos para la mayor producción de hidrógeno.

De acuerdo a [42] el neumático posee una densidad de 460 [Nm³/kg], y la carga híbrida posee un porcentaje en volumen de 50% de medio inerte y 50% de neumáticos, el volumen total del reactor para la gasificación de 1 kilogramo de NFU es:

$$V_T = \frac{m_{NFU}}{\rho_{NFU}} * 2 = \frac{1}{460} * 2 = 0,0044 [m^3]$$

La forma geométrica del reactor es un cilindro, manteniendo el diámetro de éste constante, la altura de éste será:

$$h = \frac{V_T * 4}{\pi * D^2} = \frac{0,0044 * 4}{\pi * 0,0372^2} = 4 [m]$$

Otra opción es variar el diámetro del reactor a 50 [mm] lo que implica que para mantener la velocidad de filtración constante se requiere de un caudal de aire de 14 litros por minutos, sin embargo esto haría disminuir la relación de equivalencia además de no tener valores experimentales para este trabajo de título como por ejemplo el tiempo de residencia en el reactor. Finalmente con un diámetro de 50 [mm] se disminuye la altura del reactor a 2,24 [m].

6.5 COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

La comparación se hará en base a los ingresos brutos por tonelada de neumático investigados en procesos alternativos como trituración y gasificación mediante tecnologías ya utilizadas. Estos resultados se contrastan con los ingresos brutos por tonelada de neumático por conceptos de venta de hidrógeno gaseoso que se podrían llegar a obtener en los reactores de MPI. La Tabla 40 presenta los resultados de ésta evaluación.

Tabla 40. Comparación de ingresos brutos para gasificación de NFU

Alternativa para reducción de NFU	Ingresos Brutos
	[US\$/tonelada]
Triturado	900
Gasificación con tecnología ya utilizada	263
Gasificación en MPI	385

Como se observa el valor que poseen los ingresos brutos de la gasificación del neumático a partir de la venta de hidrógeno puro es 2,33 veces menor a la opción de trituración y 1,46 veces mayor a la alternativa de gasificación ya utilizada y que no toma en cuenta la venta de hidrógeno puro. Sin embargo a pesar de estas diferencias, se hace necesario evaluar los costos de producción, es decir, costos fijos y costos variables para conocer realmente si el margen de utilidad que se podría obtener hace de la alternativa de gasificación en medios porosos una opción atractiva para el inversionista.

7. CONCLUSIONES

Se desarrolló una investigación sobre la combustión y gasificación de neumáticos fuera de uso en reactores de medios porosos inertes. Para esto, en primer lugar se estudió el marco teórico asociado al NFU se investigó el diagnóstico en Chile de la disposición final de éste residuo, los procesos de valorización física y energética a nivel nacional e internacional, además de las características generales del neumático. Por otra parte se estudiaron los fundamentos de la combustión en medios porosos inertes y algunas técnicas de muestreo que permiten analizar los productos de interés. Se concluye que a pesar de que actualmente existan iniciativas en nuestro país para la valorización comercial de éste residuo como plantas de triturado o uso en plantas cementaras, aún falta mucho desarrollo tecnológico y científico para lograr desarrollar avances que permitan brindar mayor valor y lograr de manera más eficiente, detener el alto crecimiento que tiene este residuo en nuestro país, el cual supone grandes problemas ambientales, razón por la cual el tratamiento de este pasivo ambiental debe convertirse en una política que el Estado chileno debe poner énfasis en resolver.

Luego en el procedimiento experimental se realizó el diseño e implementación de un reactor de medio poroso para la combustión y gasificación de NFU. El reactor se diseñó para la inyección de agentes gasificantes como vapor, gas natural y aire. Se concluye que se logró un correcto diseño, lo cual permitió operar adecuadamente el equipo bajo las condiciones de flujo requeridos, no hubo problemas para la toma de gases ni residuos sólidos, los procedimientos experimentales se lograron cumplir a cabalidad de manera que la investigación experimental fue llevada a cabo bajo los parámetros deseados.

Se estudió experimentalmente las temperaturas de reacción, la producción de gas de síntesis y los productos sólidos del proceso mediante cromatografía y espectrometría de fluorescencia de rayos - X. De acuerdo a los resultados experimentales se concluye que:

1. El mecanismo de gasificación del NFU en reactores de medios porosos inertes con inyección de vapor que se observó, se puede describir a través de las siguientes reacciones:

NFU \longrightarrow Gases + pequeña porción de aceites + residuos sólidos.

Gases \longrightarrow $H_2 + CO + CO_2$

Residuos sólidos \longrightarrow Diferentes metales, principalmente Zinc

Es importante mencionar que no se analizaron todos los residuos obtenidos en las experiencias de laboratorio como la parte aceitosa. Solo aquellos en los cuales se disponía de equipos para análisis.

2. De las temperaturas de reacción se concluye que el reactor, en presencia de flujo de aire, permite una estabilidad en el proceso de gasificación, además exhibe las características propias de un sistema con recirculación de calor, esto se verifica para todos los ensayos experimentales donde se gasificó con aire las temperatura máximas promedios se mantuvieron dentro de un rango de 1050 [°C] – 1200 [°C], esta tendencia no fue mayormente afectada por el porcentaje de vapor, lo que implica que las reacciones endotérmicas dentro del reactor no son predominantes. Por otra parte para los ensayos donde no se trabajó con aire, solo con vapor, las temperaturas máximas alcanzadas no permiten la gasificación del NFU, de manera que se concluye que para lograr obtener producción de gas de síntesis se hace necesaria la inyección de mayor cantidad de oxígeno para así lograr mayores temperaturas. De acuerdo a la inspección visual y a las temperatura obtenidas se puede concluir que ocurren los siguientes procesos de descomposición del NFU:

- a. Reacciones a baja temperatura (sobre 200 [°C]): el material comienza a secarse y se crea vapor de agua, en esta parte, el proceso es endotérmico.
- b. Reacciones a media temperatura (entre 200 a 500 [°C]): Comienza a secarse el neumático, éste se comienza a cristalizar de manera que es

muy fácil pulverizarlo, también comienza la emanación de gases producto del calentamiento del material.

c. Altas temperaturas (Sobre 500 a 1200 [°C]): Se emanan grandes cantidades de gases combustibles, los cuales contienen en parte gas de síntesis, las fracciones de sólidos dentro del reactor decrecen considerablemente, existe parte del material que queda adherido en forma aceitosa en la zonas de baja temperatura como el sistema de captación de sólidos y la varilla porta termocuplas.

3. De las velocidades del frente de combustión se concluye que se trabaja en un régimen lento de velocidades en un rango de 1 a 2 [cm/min], de esta forma se logra concluir que existe un desplazamiento térmico dentro del reactor.
4. De las muestras gaseosas analizadas, se observa la formación de CO, CO₂ y H₂, éste último alcanza su mayor producción para el ensayo donde se trabaja sólo con inyección de aire, con una concentración máxima de 3,27%, luego su tendencia comienza a descender cuando se agregan pequeñas porciones de gas natural y vapor. La formación de CO también ocurre solo en los ensayos con presencia de aire, su tendencia es a aumentar hasta alcanzar puntos máximos entre 20 y 40% de vapor, con concentraciones máximas de 3% para ensayos con aire y 2% para ensayos con aire y gas natural. La producción de CO₂ se explica principalmente por la combustión del neumático cuando se calienta a altas temperaturas producto del precalentamiento del reactor, su producción es máxima para los ensayos donde se trabajó con una relación volumétrica sobre el 75% de neumático.
5. De las muestras sólidas analizadas por espectrometría de fluorescencia de rayos – X, se logra caracterizar parte de los elementos que componen la fracción volátil de la gasificación del neumático, el elemento que predomina en concentración es el Zinc, además se logra detectar otros metales como K,

Ca, Ti, V, Cu y Fe, otros elementos como el Ba, Pb y Mn se detectaron mediante otra técnica utilizada.

6. Luego de realizados los ensayos experimentales y con estos resultados se procedió a analizar las variables relevantes para el escalamiento y fabricación del equipo reactor. Se concluyó que las variables necesarias para evaluar el escalamiento eran la producción de H_2 a partir de la masa de neumático, la conservación de parámetros importantes en su producción como la velocidad de filtración dentro del reactor que considera variables geométricas y la relación de equivalencia que considera las variables física y químicas del proceso térmico. Para el análisis de la fabricación se hizo una investigación de los procesos alternativos para la comercialización de los neumáticos en Chile, encontrándose que la principal iniciativa es la trituración y el uso en plantas cementeras, por otra parte, se determinó que internacionalmente existen empresas dedicadas a la valorización energética de este residuo. En vista de éstos datos, se procedió a compararlos con respecto a los posibles ingresos brutos obtenidos a partir de la producción y comercialización de H_2 a partir del neumático, importante mencionar que los valores calculados para la tecnología de combustión en medios porosos supone una estimación muy general de los ingresos brutos por concepto de ventas, sin embargo, la alternativa parece bastante atractiva suponiendo que los costos en generación no deberían ser tan altos, para poder realizar nuevas investigaciones con respecto a la producción de este gas a partir de un residuo como es el neumático fuera de uso.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **INSTITUTO Nacional de Estadísticas.** “*Anuario Parque de Vehículos en Circulación*”, 2011.
- [2] **INSTITUTO Nacional de Estadísticas.** “*Cifras parque de vehículos en circulación*”, 2012.
- [3] **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y Ministerio de Medio Ambiente.** “*Evaluación económica, ambiental y social de la implementación de la REP en Chile*”, Diciembre 2011, Santiago, Chile.
- [4] **CONSEJO de Producción Limpia (CPL).** “*Acuerdo de Producción Limpia: Prevención y Valorización de Neumáticos Fuera de Uso*”. Septiembre 2009.
- [5] **Lazcano P.** “*Reciclaje de neumáticos en Chile aumenta nueve veces desde 2008*”. [en línea] La Tercera en Internet. Mayo 2013
<<http://diario.latercera.com/2013/05/06/01/contenido/tendencias/16-136130-9-reciclaje-de-neumaticos-en-chile-aumenta-nueve-veces-desde-2008.shtml>>
- [6] **Bravo M.B** “*Reciclaje de Neumáticos*” SustentaBiT
- [7] **Flores C.** “*Factibilidad del aprovechamiento energético de neumáticos usados en la gran minería del cobre mediante pirolisis*”. Universidad de Chile.
- [8] **Neumáticos MEDICA:** “*Partes de un neumático*” [en línea]
<<http://www.neumaticosmedica.com.ar/partes.html>>
- [9] **GoodYear** “*Como leer un neumático*” [en línea]
<http://www.goodyear.com.ar/tire_know/tire_learn/>
- [10] **Rubber Manufacturers Association (R.M.A).** “*U.S Scrap Tire Markets, 2006*” Noviembre, 2006.

- [11] **Environmental Protection Agency (E.P.A).** “*Scrap Tires Handbook on Recycling Applications and Management for the U.S. and Mexico*”, Estados Unidos Cap4, p35-50.
- [12] **Duggirala B.** “*Tire Derived Fuel Study*” TIRE STEWARDHIP Manitoba.
- [13] **CalRecovery Inc.** “*Final Report: Environmental Factors of Waste Tires Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction*”. California Estados Unidos, Julio 1995.
- [14] **Clarck C, Meadron K. et al** “*Burning Tires for Fuel and Tire Pyrolysis*” Pacific Environmental Services for EPA 1991.
- [15] **Bedia J. Rodríguez J. Cordero T.** “*Reciclado y Reutilización de NFU Alternativas a recuperación de energía*”. Departamento de Ingeniería Química, ETSI Industriales de Málaga.
- [16] **Aguado J. Serrano D.** “*Feedstock Recycling of Plastic Wastes*”. Cap3 p58 – 60. 1999.
- [17] **New Jersey Department of Health and Senior Services** “*Hoja informativa sobre substancias peligrosas*”. 1998.
- [18] **International Carbon Black Association (ICBA)** “*Carbon Black User’s Guide – Safety, Health, & Environmental Information*”, Junio 2004.
- [19] **Park T. Lovell, C.W,** “*Using Pyrolyzed Carbon Black (PCB) from Waste Tires in Asphalt Pavement (Part 1, Limestone Aggregate)*”, Universidad de Purdue, 1996.
- [20] **Shah J, Rasul Jan M. Mabood F.** “*Conversion of Waste Tires into Carbon Black and their Utilization as Adsorbent*”. Departamento de Química, Universidad de Peshawar, Pakistán 2006.

- [21] **Weissermel K, Arpe H-J.** “*Química orgánica industrial*” Cap2 p17. 1981.
- [22] **Liu K. Chunshan S. Subramani V.** “*Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies*” Cap1, p5. 2010.
- [23] **Vafai K.** “*Handbook of Porous Media*” Cap15 p607 – 64, 2005.
- [24] **Trimis D. Wawrzinek K.** “*Modelling Fluid Flow - Flame stabilization of highly diffusive gas mixtures in porous media*”. p 107 – 121.2004.
- [25] **Mujeebu M. Abdullah M. Abu Bakar M. Mohamad A.** “*Applications of porous media combustion technology – A review*”. 2009.
- [26] **Mujeebu M. Abdullah M. Abu Bakar M. Mohamad A. R.Muhad** “*Combustion in porous media and its applications – A comprehensive survey*” 2009.
- [27] **GRUPO de investigación de combustión en medios porosos** [en línea] <<http://www.combustion.mediosporosos.usm.cl/index.html>>
- [28] **Calvo J. R, Escamilla L.** “*Manual de práctica de química analítica II*”, Universidad Autónoma Metropolitana 1999.
- [29] **UNIVERSIDAD Central de Venezuela.** “*Guía de Cromatografía*”, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Caracas 2008.
- [30] **AmpTek.** “*X-ray Fluorescence Tutorial – X-Ray Fluorescence – A Description*” [en línea] <<http://www.amptek.com/pdf/xrf.pdf>>
- [31] **UNIVERSIDAD de California Riverside** “*Introduction to Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDS)*”, p6-10.
- [32] **Gaughlitz G, Vo-Dinh T.** “*The Handbook of Spectroscopy*” Cap3, p1–7.2003.

- [33] **Shackley M.** “*X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*”, Cap2, p18-19.
- [34] **Sitko R. Zawisza B.** “*Quantification in X-Ray Fluorescence Spectrometry*” Department of Analytical Chemistry, Institute of Chemistry, University of Silesia, Polonia. 2012.
- [35] **Zheng C. Cheng L. Bingue J. Savaliev A. Cen K.** “*Partial Oxidation of Methane in Porous Reactor: Part I. Unidirectional Flow*” *energy&fuels*. p4849-4855. 2012.
- [36] **Toledo M. Bubnovich V. Savaliev A. Kennedy L.** “*Hydrogen production in ultra-rich combustion of hydrocarbon fuels in porous media*” *International Journal for Hydrogen Energy*. p 1818 - 1827. 2009.
- [37] **Toledo M. Vergara E. Savaliev A.** “*Syngas production in hybrid filtration combustion*” *International Journal for Hydrogen Energy*. p3907-3912.2009.
- [38] **Salgansky A. Kislov S. Glazov S. Zholudev A. Manelis G.** “*Filtration Combustion of a Carbon – Inert Material System in the Regime with Superadiabatic Heating*”. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol.44, No.3 p273-280.2008.
- [39] **Xiao G. Ni M-J. Chi Y. Cen K-F.** “*Low-temperature gasification of waste tire in a fluidized bed*” *Energy Conversion and Management* 49. p2078-2082. 2008.
- [40] **Whatman** “*Catálogo general*”, 2008.
- [41] **Adachi K, Tainosho Y.** “*Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust*” *Environment International* 30.p1009 – 1017. 2004.

- [42] **Rubber Manufacturers Association (R.M.A)** “*Scrap Tire Characteristics: Densities of Shredded and Whole Tires - Analysis of scrap tire fly ash*” [en línea]
<<http://www.energyjustice.net/files/tires/files/scrapchn.html#anchor545131>>
- [43] **Hartley B, Steinbeck S** “*Analysis of Tire Chips as a Substitute for Stone Aggregate in Nitrification Trenches of Onsite Septic Systems: Status and Notes on the Comparative Microbiology of Tire Chip Versus Stone Aggregate Trenches*” *Small Flows Quarterly*, Vol4, p21. 2003.
- [44] **Al-Hamamre Z. Al-Zoubi A.** “*The use of inert porous media based reactors for hydrogen production*” *International journal of hydrogen energy* 35, p1971 – 1986.2010
- [45] **Araya D.** Memoria de Título: “*Diseño e implementación de quemador de medios porosos inertes a escala industrial para oxidación parcial de mezclas glicerol metanol*” UTFSM, Marzo 2012.
- [46] **Bingue J, Saveliev A, Fridman A. Kennedy L.** “*Hydrogen production in ultra-rich filtration combustion of methane and hydrogen sulfide*”. *International journal of hydrogen energy* 27, p643-649.2002
- [47] **WIKIPEDIA** la Enciclopedia libre: “*Hydrogen Economy*”: [en línea]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy>.[Consulta 6 de Mayo 2014]
- [48] **COMISIÓN de Energía de California** “*Chapter 20: Hydrogen and Future Energy Sources*” [en línea] *Energy Quest*
<<http://www.energyquest.ca.gov/story/chapter20.html>>
- [49] **The Linde Group.** “*Cotización precios de gases*” 10 Junio 2013.

- [50] **UNIVERSIDAD de California Riverside** “*Technology Evaluation and Economic Analysis of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction*”.
Marzo 2006. Cap6, p35 – 46.

ANEXO A: RESULTADOS DE ESPECTRÓMETRÍA DE RAYOS X

A.1 ESPECTRO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO

Se presenta el espectro tomado mediante XRF para muestras de neumáticos fuera de uso a gasificar. De esta forma se puede tener una referencia de cuáles son los elementos propios del neumático que se logran retener en el papel filtro cuando pasa la corriente de gases provenientes de la combustión del sólido.

Se observa la presencia de Cromo (Cr), Hierro (Fe), Cobalto (Co), Cobre (Cu) y en mayor intensidad el Zinc (Zn).

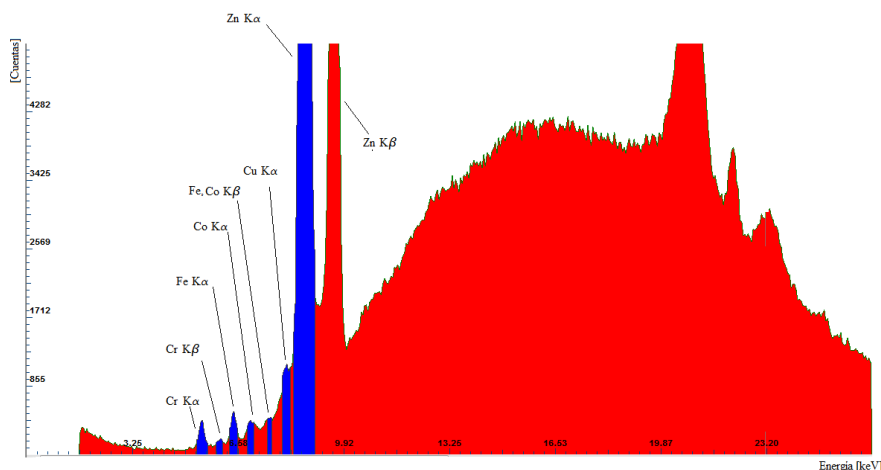


Figura 16. Espectro de NFU por XRF.

A.2 ESPECTRO DE AISLANTE TÉRMICO CERÁMICO

El papel filtro presenta materiales cuya procedencia se desconoce de manera que se hace necesario investigar las causas de la presencia de estos elementos, a continuación se presenta el espectro del aislante térmico interno el cual desprende material que puede ser trasladado por la corriente de gases hacia el papel filtro de muestreo.

El peak que se observa antes de la línea del Potasio (K) corresponde al Argón (Ar) que pertenece al aire, por otra parte, existe presencia de Calcio (Ca), Titanio (Ti),

Vanadio (V), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Estroncio (Sr) y Zirconio (Zr) y una pequeña cantidad de Potasio (K).

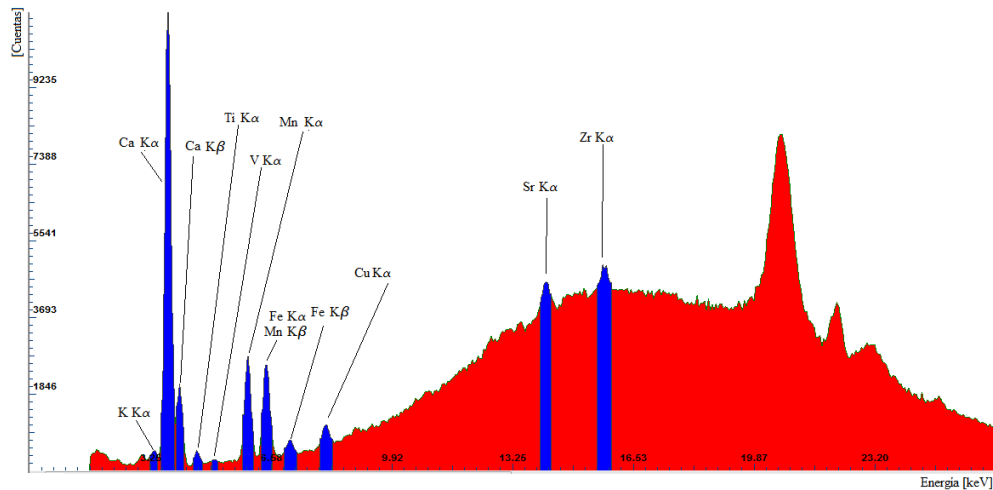


Figura 17. Espectro de aislante térmico por XRF.

A.3 ESPECTRO PAPEL FILTRO LIMPIO

La Figura 18 corresponde al espectro de una muestra del papel filtro utilizado para la captación de sólidos en la corriente de gases de escape, supone una “línea base” para hacer la comparación de los elementos encontrados en los filtros saturados. Además se comprobó los elementos residuales indicados en las especificaciones indicadas por el fabricante [40], sin embargo no fue posible detectar todos los elementos reportados.

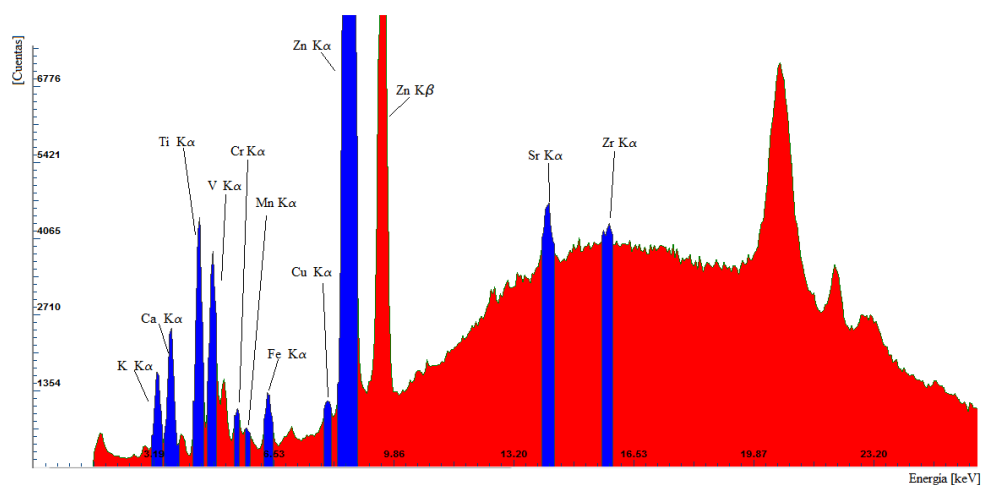


Figura 18. Espectro de papel filtro por XRF.

A.4 ESPECTRO CARACTERÍSTICO DE PAPEL FILTRO SATURADO

Se presenta el espectro tomado mediante XRF para las muestras de papel filtro obtenido de los ensayos experimentales de combustión de neumáticos, el espectro expuesto resulta ser característico para todos los ensayos pues los elementos poseen niveles de energías específicos, las variaciones que se presentan en cada uno de ellos son resultado de los cambios en la intensidad medida, la cual se detalla en las tablas correspondientes a cada ensayo. Además se presenta un espectro realizado en la Universidad de Concepción mediante “*Total Reflection X – Ray Fluorescence (TXRF)*”.

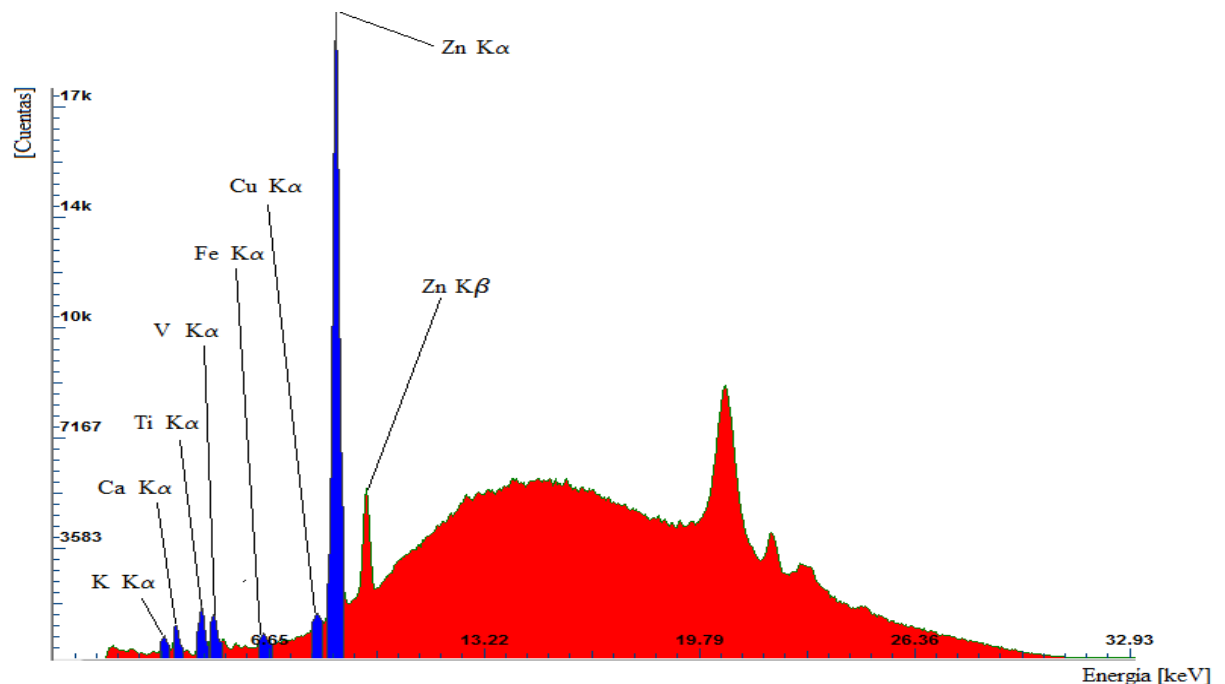


Figura 19. Espectro característico de papel filtro saturado por XRF.

A continuación se presenta el espectro tomado en la Universidad de Concepción.

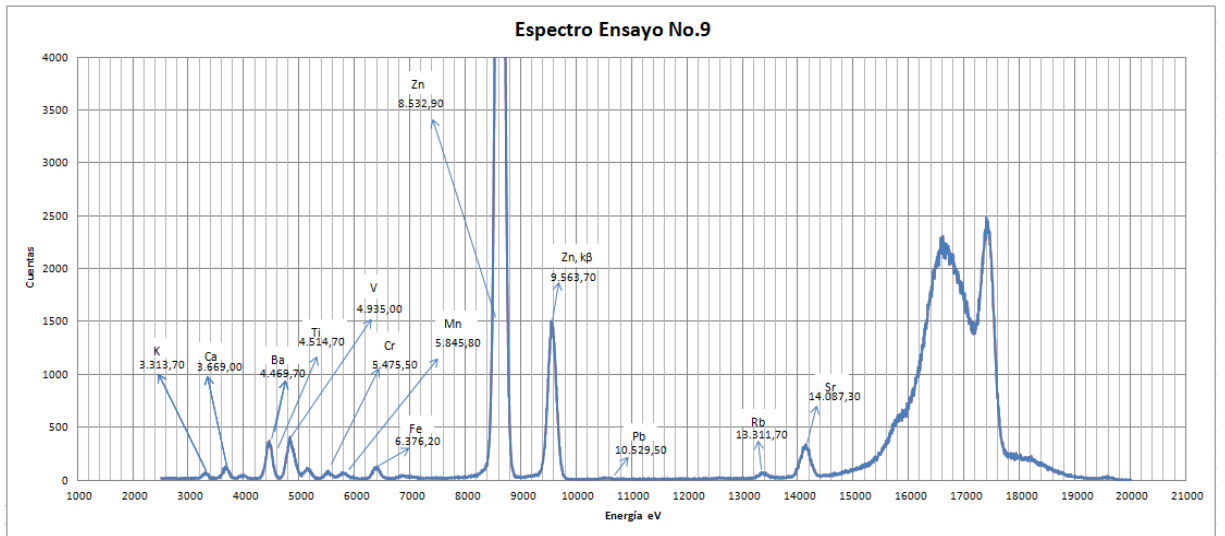


Figura 20. Espectro característico de papel filtro saturado por XRF (UdeC).

A.5 ESPECTRO POLVO DE NFU

La Figura 21 presenta el resultado de la espectrometría por XRF, del polvillo de neumático perteneciente a los ensayos No.8, 9 y 10, en donde se obtuvo la cristalización del material sólido. Se observa la detección de K, Ca, Ti, Cr, Fe, Cu, Zn, Rb, Sr y Zr, éste último, perteneciente al aislante térmico interior.

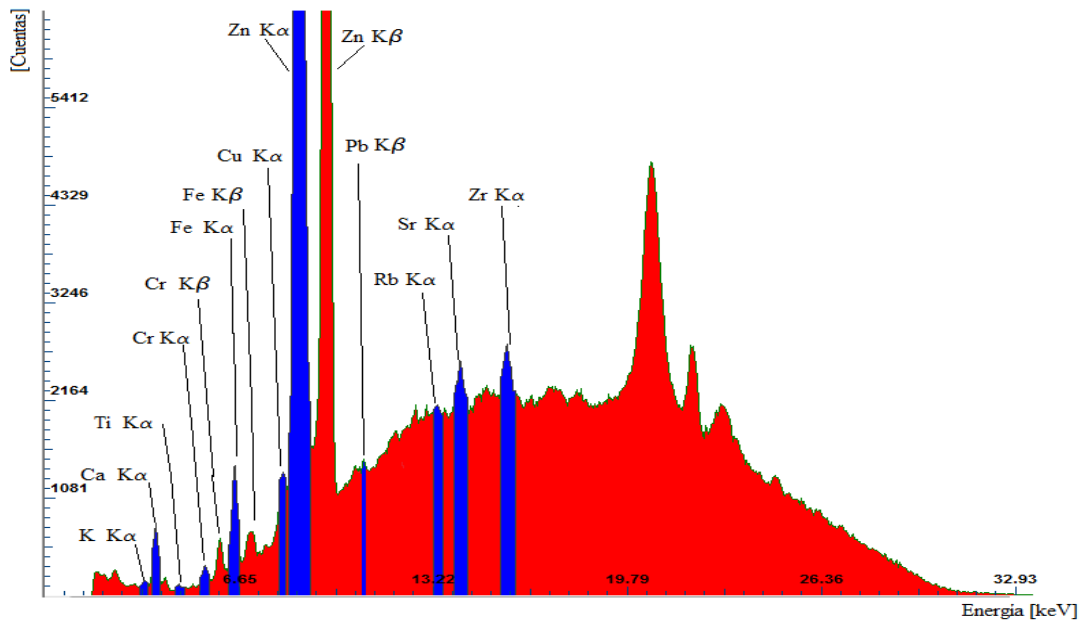


Figura 21. Espectro de polvo de NFU por XRF.

ANEXO B: PRESENTACIÓN DE PAPEL FILTRO

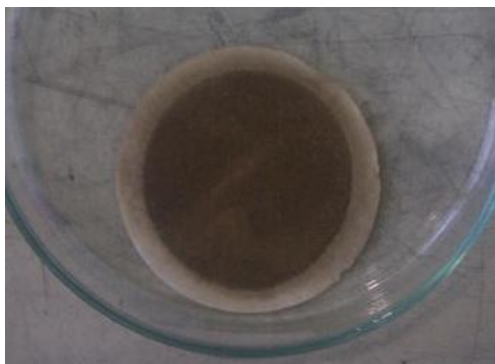
En este anexo se presentan las fotografías de los papeles filtros utilizados para el análisis de residuos por espectrometría de fluorescencia de rayos – X, también permiten obtener una inspección visual de la cantidad de compuestos volátiles emitidos durante las experiencias.

Conjunto 1

Ensayo No.1



Ensayo No.2



Ensayo No.3

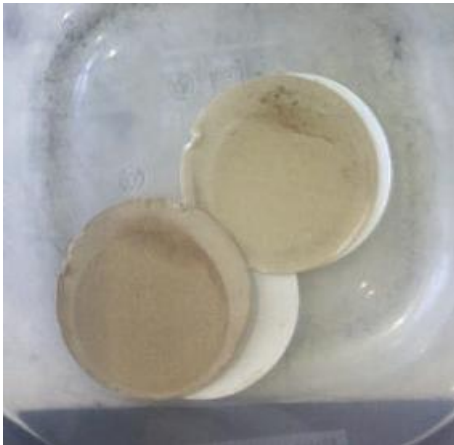


Ensayo No.4



Conjunto 2

Ensayo No.5



Ensayo No.6



Ensayo No.7



Conjunto 3

Ensayo No.8



Ensayo No.9



Ensayo No.10

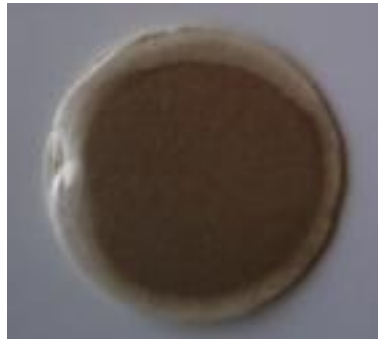


Conjunto 4

Ensayo No.11



Ensayo No.14



Ensayo No.12



Ensayo No.13



ANEXO C: RELACIÓN DE EQUIVALENCIA PARA MEZCLA HÍBRIDA

ANÁLISIS ELEMENTAL DEL NEUMÁTICO COMO TDF:

Fracción másica:

- C : 83,79%
- H: 7,13%
- N: 0,24%
- S: 1,84%
- O: 2,19%

PROPIEDADES FÍSICAS Y DATOS DE OPERACIÓN

Densidad del TDF (50 mm)	: 460 [kg/Nm ³]
Caudal volumétrico de aire	: 8 [LPM] – 1,33 x 10 ⁻⁴ [m ³ /s]
Masa de neumático inyectado (batch)	: 0,034 [kg]
Tiempo de residencia del neumático	: 16 [min] – 960 [s]

CAUDAL VOLUMÉTRICO DE COMBUSTIBLE

El flujo másico para el sistema batch se puede calcular como:

$$\dot{m}_{\text{NFU}} = \frac{m_{\text{NFU}}}{\text{tr}} = \frac{0,034}{960} = 3,541 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Por lo tanto el caudal volumétrico de combustible queda:

$$\dot{V}_{\text{NFU}} = \frac{\dot{m}_{\text{NFU}}}{\rho_{\text{NFU}}} = \frac{3,541 \times 10^{-5}}{460} = 7,699 \times 10^{-8} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

VOLUMEN DE AIRE ESTEQUIOMÉTRICO

El volumen de aire estequiométrico se calcula como:

$$V_{a,e} = \frac{22,39}{0,21} \left(\frac{C}{12,011} + \frac{H}{4,032} + \frac{S}{32,065} - \frac{O}{32} \right) = 9,30 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right]$$

CAUDAL VOLUMÉTRICO DE LA MEZCLA

El caudal total de la mezcla de aire más combustible es:

$$\dot{V}_{MEZCLA} = \dot{V}_{NFU} + \dot{V}_a + \dot{V}_{vap}$$

CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE EQUIVALENCIA

Se tiene de desarrollos anteriores que:

$$\dot{V}_{NFU} = \frac{\dot{V}_{mezcla}}{1 + \left(\frac{V_{a,e} * \dot{\rho}_{comb}^{(0)}}{\phi} \right)} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

El cálculo se hace para ϕ , los resultados se presentan en la Tabla 41.

Tabla 41. Relación de equivalencia para conjunto 1 de ensayos.

No. Ensayo	Volumen de Aire	Volumen de Vapor	Volumen de NFU	Volumen de CH4	Relación de Equivalencia
-	[LPM]	[LPM]	[ml]	[LPM]	ϕ
Ensayo 1	8	0	70	0	2,47
Ensayo 2	8	1,6	70	0	2,06
Ensayo 3	8	3,2	70	0	1,77
Ensayo 4	8	4,8	70	0	1,55

ANEXO D: PERFIL DE TEMPERATURA EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LAS TERMOCUPLAS

En este anexo se muestra esquemáticamente como es el avance del frente de combustión. En los gráficos se puede apreciar las zonas de alta y baja temperatura, las cuales corresponden al ensayo No.1. La propagación del frente es aguas abajo, es decir, en la misma dirección que la inyección de los oxidantes, la ignición comienza en la termocupla No.3 y hasta llegar a la termocupla No.1.

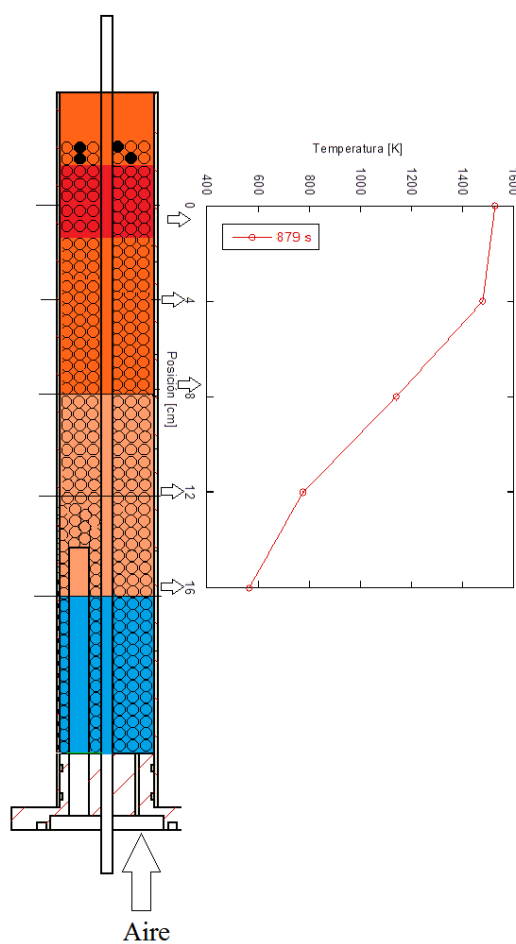


Figura 22. Avance del frente en termocupla No.3

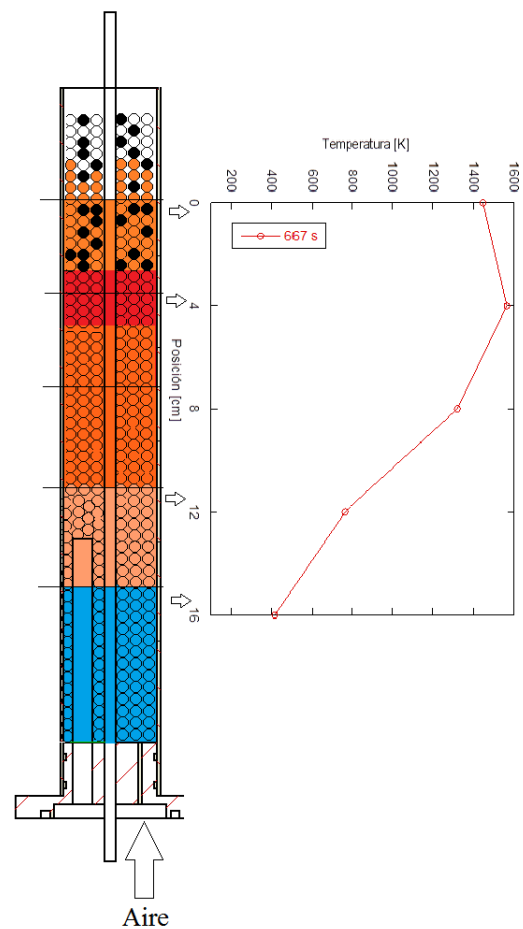


Figura 23. Avance del frente en termocupla No.2

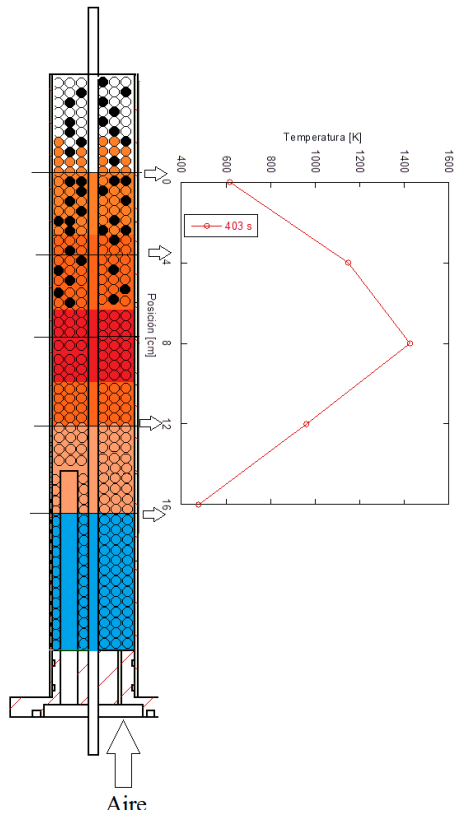


Figura 24. Avance del frente en termocupla No.1