



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EFFECTO DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL
RECICLAJE DE LLANTAS VEHICULARES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A :

ANA MARCELA FUENTES MARILES





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente	Prof. JOSE MARIA GARCIA SAIZ
Vocal	Prof. VICTOR MANUEL LUNA PABELLO
Secretario	Prof. ROCÍO GARCÍA MARTÍNEZ
1er. Suplente	Prof. BALDOMERO PEREZ GABRIEL
2º. Suplente	Prof. MARIA EUGENIA LUGO LOPEZ

Sitio en donde se desarrolló el tema:

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CIRCUITO EXTERIOR s/n, CIUDAD UNIVERSITARIA
DEL. COYOACAN C.P. 04510 Teléfono: 56224050

Nombre completo y firma del asesor del tema

M. en C. ROCÍO GARCÍA MARTÍNEZ

Nombre completo y firma del sustentante

ANA MARCELA FUENTES MARILES

Dedicatorias

A mi mamá, Marcela Fuentes:

Tu apoyo siempre lo he tenido, hoy termina un camino difícil en mi vida, pero con solo tenerte a mi lado se facilita, el camino lo recorrimos juntas y tu cariño hizo que se hiciera más fácil. Gracias mamá por consentirme y darme todo lo que he querido, este logro es para las dos.

A mi abue, Ana Mariles:

Abue, muchas gracias por tu apoyo y cariño, eres a quien más admiro, me has enseñado a nunca rendirme y luchar por lo que quiero. Tu fortaleza ha sido un gran ejemplo de lo que quiero llegar a ser, eres mi segunda mamá y cuando me dices lo mucho que crees en mí hace que me den más ganas de lograr mis sueños.

A mi hermana, Danielita:

Wery, ya por fin se termina esto!!!!, Gracias a ti por enseñarme que existen otras cosas en la vida, me has ayudado mucho a disfrutar cada momento de risas y alegría que tenemos.

A Adrián:

Nenito, gracias por siempre estar ahí siempre, no he necesitado decirte nunca lo que pienso, por que lo sabes de inmediato, sin tí mi vida no sería igual, no hubiera podido descubrir cosas que tenía, no sería lo que soy hoy y me has mostrado que puedo llegar a ser más. El tenerte junto a mi ha mejorado mucho mi vida y me has hecho entender que la vida vale mucho si la disfrutas junto a alguien que te entiende, te soporta y comparte todo contigo.

A Dení:

Gracias por estar ahí cuando lo necesitaba, eres la hermanita con la que puedo platicar de mil cosas y sé que me entiendes, tu apoyo y confianza siempre han sido muy importantes para mí y mi desarrollo en todos los aspectos.

A Lupita:

Gracias a ti escogí mi carrera y de verdad que me gustó, tu apoyo ha estado ahí siempre aunque no lo haya necesitado, sé que puedo llegar contigo y pedirte cualquier cosa, desde hojas de papel (en el Insti) hasta que me defiendas de la gente. Eres un ejemplo a seguir y estaré siempre agradecida por todo el cariño que me has brindado.

A todos mis tíos y tías, Gonzalo, Gloria, Paty, Leti, Sonia, Chiquis, Oscar, Arturo, Carlos, Felipe, que siempre han estado ahí para apoyarme y quererme, les agradezco por su confianza y los buenos ratos que hemos pasado.

A Ales y Kary:

Gracias por su confianza y alegría, por hacer que esta vida se haga más ligera y por enseñarme a disfrutar de una buena peliculita y apoyarme siempre en todo.

A mis primos, Jelipe, Carlitos, Mayis, Artu, Bere, Oscar y Beto, ¡gracias primos!, por estar junto a mí disfrutando de muy buenos momentos en la vida.

A Malu y a Panchito:

Gracias por su confianza y cariño, por tratarme como a alguien más de su familia, las tardes de juego son algo muy importante en mi vida donde se comparten momentos alegres, de esos que nunca se olvidan.

Al Isra:

Mijo, eres mi gran amigo, has estado ahí siempre y por ti se lo que es la amistad eres mi carnalito y gracias a ti logré muchas cosas, me enseñaste a divertirme como enana, a carcajearme, a llegar a comprender el valor de la amistad.

A Alfredito:

Fredito, gracias por dejarme zanganear en la ludo, eres un gran amigo y tu apoyo siempre ha esta ahí, gracias a ti se lograron cosas importantes en la facultad.

Al Chavin:

¡Que buenos paros hacías!, eres mi gran amigo que estuvo cuando lo necesité, que me ayudaba a entender cosas que no podía entender, con el que disfrutaba momentos que eran difíciles y tristes, eres un amigo inolvidable.

A Estebi y Rubens, que estuvieron en algunas clases haciendo que fueran más livianas, divirtiéndonos a lo lindo, jugando los viernes en las tardes, facilitando las largas jornadas de trabajo que teníamos.

A Norma, que siempre estuvo al pendiente de todo, que llegaba a distraerme un ratito y comadreábamos a gusto.

EFFECTO DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL RECICLAJE DE LLANTAS VEHICULARES

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
GLOSARIO.....	7
RESUMEN.....	10

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.2 PLANTEAMIENTO.....	15
1.3 OBJETIVO.....	15
1.4 METAS.....	15

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

2 ANTECEDENTES.....	17
2.1 CAUCHO NATURAL.....	22
2.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS.....	22
2.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS.....	23
2.1.3 PROCESAMIENTO DEL HULE NATURAL.....	24
2.2 CAUCHO SINTÉTICO.....	25
2.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS.....	25
2.2.2 PROPIEDADES QUÍMICAS.....	26
2.3 CAUCHO SBR (HULE ESTIRENO-BUTADIENO).....	27
2.3.1 PROCESADO DEL HULE SBR.....	28
2.4 VULCANIZACIÓN.....	29
2.4.1 TIPOS DE VULCANIZACIÓN.....	33
2.4.1.1 LÍNEA DE VULCANIZACIÓN A BAÑO DE SALES.....	33

2.4.1.2	VULCANIZACIÓN POR MICROONDAS.....	34
2.4.1.3	VULCANIZACIÓN CON RADIACIÓN POR INFRARROJOS.....	34
2.5	PRODUCCIÓN MUNDIAL DE HULE.....	35
2.6	MANUFACTURA E INGENIERÍA DE LAS LLANTAS.....	37
2.6.1	COMPORTAMIENTO DE LAS LLANTAS.....	42
2.6.2	PROBLEMAS DE RECICLAJE.....	43

CAPÍTULO 3 PROCESOS DE RECICLAJE

3.1	DESVULCANIZACIÓN.....	47
3.1.1	DESVULCANIZACIÓN TÉRMICA.....	47
3.1.2	DESVULCANIZACIÓN ULTRASÓNICA.....	47
3.1.3	DESVULCANIZACIÓN MECÁNICA.....	48
3.1.4	RECUPERACIÓN MECÁNICA.....	48
3.1.5	DESVULCANIZACIÓN POR MICROONDAS.....	49
3.1.6	DESVULCANIZACIÓN POR DESULFURACIÓN.....	50
3.2	INCINERACIÓN.....	51
3.2.1	INCINERACIÓN EN HORNOS ROTATORIOS.....	53
3.2.2	INCINERADORES A NIVELES MÚLTIPLES (TABQUERAS).....	55
3.2.3	CONTROL DE EMISIONES Y CONSECUENCIAS.....	56
3.3	PIRÓLISIS.....	57
3.3.1	PIRÓLISIS A BAJA TEMPERATURA.....	58
3.3.2	PIRÓLISIS A ALTA TEMPERATURA.....	59
3.4	GASIFICACIÓN.....	61
3.4.1	TERMOQUÍMICA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	63
3.4.2	FACTORES DE OPERACIÓN.....	64
3.4.3	FACTORES DEPENDIENTES DEL RESIDUO GASIFICADO.....	66
3.4.4	PRINCIPALES TIPOS DE GASIFICADORES.....	68
3.4.4.1	GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO.....	68
3.4.4.2	GASIFICADOR DE LECHO MÓVIL EN CONTRACORRIENTE.....	69
3.4.4.3	GASIFICADOR DE LECHO MÓVIL EN CORRIENTES PARALELAS....	70

3.4.4.4	PLASMA (GASIFICACIÓN A ALTA TEMPERATURA.....)	71
3.4.4.5	GASIFICADOR DE HORNO ROTATIVO.....	72
3.4.5	ELECCIÓN DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE LA FRACCIÓN NO RECICLABLE.....	74
3.5	TRITURACIÓN.....	76
3.5.1	TRITURACIÓN MECÁNICA.....	76
3.5.2	TRITURACIÓN CRIOGÉNICA.....	78
3.6	REENCAUCHADO Ó RENOVADO.....	79
3.6.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	80
3.6.2	PROCESO DE MANUFACTURA DE LA BANDA DE RODAMIENTO.....	80
3.7	DEGRADACIÓN CATALÍTICA.....	81

CAPÍTULO 4 EFECTO DE LOS CONTAMINANTES

4.1	MONÓXIDO DE CARBONO (CO).....	85
4.2	CLORURO DE HIDRÓGENO (HCl).....	87
4.3	DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂).....	88
4.4	ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x).....	90
4.4.1	MONÓXIDO DE NITRÓGENO (NO).....	90
4.4.2	DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO ₂).....	91
4.5	COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV's).....	92
4.5.1	METANO (CH ₄).....	92
4.5.2	BENCENO.....	93
4.5.3	TOLUENO.....	94
4.6	HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (PAH's).....	95
4.7	DIOXINAS Y FURANOS.....	96
4.8	BIFENILOS POLICLORADOS (BPC's).....	97
4.9	ÓXIDO DE ZINC.....	99

CAPÍTULO 5 PROGRAMAS Y LEGISLACIÓN EN LA REPÚBLICA MEXICANA

5.1	LEGISLACIÓN.....	101
5.1.1	LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE.....	101
5.1.2	LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	101
5.1.3	LEY AMBIENTAL DEL DISTRITO FEDERAL.....	101
5.1.4	LEY DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PARA EL DISTRITO FEDERAL.....	101
5.2	PROGRAMAS ESTATALES.....	102
5.2.1	NORTE DEL PAÍS.....	102
5.2.2	CENTRO DEL PAÍS.....	103
5.3	NORMAS OFICIALES MEXICANAS (NOM).....	104
5.3.1	SECRETARÍA DE SALUD.....	104
5.3.2	SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT).....	105
CAPÍTULO 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		107
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES.....		110
BIBLIOGRAFÍA.....		112

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 LLANTAS DESECHADAS POR PAÍS.....	12
TABLA 1.2 COMPUESTOS GENERADOS EN INCENDIO DE LLANTAS.....	13
TABLA 2.1 ANÁLISIS QUÍMICO DEL NEUMÁTICO.....	20
TABLA 2.2 PRODUCCIÓN DE LLANTAS.....	21
TABLA 2.3 PRINCIPALES HULES SINTÉTICOS.....	25
TABLA 2.4 PRIMERA MEZCLA DE VULCANIZACIÓN.....	29
TABLA 2.5 ADICIÓN DE ADITIVOS.....	29
TABLA 2.6 MEZCLA VULCANIZADORA ACTUAL.....	30
TABLA 2.7 FORMULACIONES PARA LA VULCANIZACIÓN DE DIFERENTES CAUCHOS.....	31
TABLA 2.8 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE HN.....	35
TABLA 2.9 CONSUMO DE HN.....	35
TABLA 2.10 PRODUCCIÓN DE HULE SINTÉTICO.....	36
TABLA 2.11 CONSUMO DE HULE SINTÉTICO.....	36
TABLA 2.12 COMPOSICIÓN FÍSICA DE LAS LLANTAS.....	38
TABLA 2.13 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS LLANTAS.....	39
TABLA 3.1 COMPOSICIÓN DE LOS GASES EN LAS EMISIONES DEL HORNO CEMENTERO.....	52
TABLA 3.2 COMPARACIÓN ENTRE COMBUSTIBLES.....	54
TABLA 4.2 EFECTOS EN LA SALUD DEL HCL.....	87
TABLA 4.3 EXPOSICIÓN DE SO ₂	89
TABLA 4.4.1 RIESGOS DE EXPOSICIÓN DE NO.....	91
TABLA 4.4.2 LÍMITES DE EXPOSICIÓN DE NO ₂	91
TABLA 4.5.3 RIESGOS DE EXPOSICIÓN DE TOLUENO.....	94
TABLA 4.9 RIESGOS DE EXPOSICIÓN DE ÓXIDO DE ZINC.....	99
TABLA 5.1 NORMAS OFICIALES MEXICANAS SSA.....	104
TABLA 5.2 NORMAS OFICIALES MEXICANAS SEMARNAT.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 DESTINO DE LLANTAS USADAS EN MÉXICO.....	14
FIGURA 2.1 FÓRMULAS RAMIFICADAS DE ACELERADORES ORGÁNICOS..	18
FIGURA 2.2 FÓRMULAS RAMIFICADAS DEL CAUCHO.....	23
FIGURA 2.3 FÓRMULA RAMIFICADA DEL CAUCHO NATURAL.....	23
FIGURA 2.4 PROCESAMIENTO DEL HULE NATURAL.....	24
FIGURA 2.5 MATERIAS PRIMAS DEL CAUCHO SINTÉTICO.....	26
FIGURA 2.6 FÓRMULA DEL CAUCHO SBR.....	27
FIGURA 2.7 PROCESAMIENTO DEL HULE SBR.....	28
FIGURA 2.8 ACELERADORES.....	30
FIGURA 2.9 QUÍMICA DE LA VULCANIZACIÓN.....	32
FIGURA 2.10 INFORMACIÓN EN UNA LLANTA.....	37
FIGURA 2.11 DISEÑOS.....	39
FIGURA 2.12 LLANTA RADIAL Y CONVENCIONAL.....	40
FIGURA 2.13 INFLADO DE LLANTAS.....	41
FIGURA 2.14 DISEÑOS BÁSICOS DE LLANTAS.....	42
FIGURA 3.1 PROCESO PIROLÍTICO.....	59
FIGURA 3.2 GASIFICADOR DE LLANTAS.....	61
FIGURA 3.3 COMPARACIÓN DE NIVELES ENTRE COMBUSTIÓN Y GASIFICACIÓN.....	63
FIGURA 3.4 GASIFICADOR DE HORNO ROTATIVO.....	73
FIGURA 3.5 EQUIPO DE TRITURACIÓN MECÁNICA.....	77
FIGURA 3.6 TRITURACIÓN CRIOGÉNICA.....	78
FIGURA 4.1 BENCENO.....	93
FIGURA 4.2 PAH'S CARCINOGENICOS.....	95
FIGURA 5.3 FÓRMULAS RAMIFICADAS DE DIOXINA Y FURANO.....	96

GLOSARIO

ASOCIACIONES

- 1 **ANDELLAC:** ASOCIACIÓN NACIONAL DE DISTRIBUIDORES DE LLANTAS Y PLANTAS RECICLADORAS A.C.
- 2 **CANACEM:** CÁMARA NACIONAL DEL CEMENTO
- 3 **EPA:** AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS.
- 4 **ETRA:** ASOCIACIÓN EUROPEA DE RECICLAJE DE NEUMÁTICOS
- 5 **INE:** INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA
- 6 **IARC:** AGENCIA INTERNACIONAL PARA LA INVESTIGACIÓN DEL CÁNCER
- 7 **SEMARNAT:** SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
- 8 **OMS:** ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

COMPUESTOS QUÍMICOS

- 9 **Ar:** Argón
- 10 **CaO:** Óxido de calcio
- 11 **CFC'S:** Clorofluorocarburos
- 12 **CH₄:** Metano
- 13 **Cl₂:** Cloro
- 14 **CO:** Monóxido de carbono
- 15 **COP's:** Compuestos orgánicos persistentes
- 16 **COSV's:** Compuestos orgánicos semivolátiles
- 17 **COV's:** Compuestos orgánicos volátiles
- 18 **H₂:** Hidrógeno
- 19 **H₂O:** Agua
- 20 **H₂S:** Sulfuro de hidrógeno
- 21 **H₂SO₄:** Ácido sulfúrico
- 22 **HCl:** Cloruro de hidrógeno

- 23 **He:** Helio
- 24 **K₂O:** Óxido De Dipotasio
- 25 **Kr:** Criptón
- 26 **MgO:** Óxido de magnesio
- 27 **N₂O:** Monóxido de dinitrógeno
- 28 **Ne:** Neón
- 29 **NH₃:** Amonio
- 30 **NO:** Monóxido de nitrógeno
- 31 **NO₂:** Dióxido de nitrógeno
- 32 **NO_x:** Óxidos de nitrógeno
- 33 **O₃:** Ozono
- 34 **P₂O₅:** Pentóxido de fósforo
- 35 **PAH's:** Halogenuros aromáticos policíclicos
- 36 **PCB's:** Bifenilos policlorados
- 37 **PCD:** Policlorodibenzodioxinas
- 38 **PCDF:** Policlorodibenzofuranos
- 39 **SH₂:** Ácido sulfhídrico
- 40 **SO₂:** Dióxido de azufre
- 41 **SO₃:** Trióxido de azufre
- 42 **Xe:** Xenón

CONCEPTOS

- 43 **CHAR:** Residuo sólido que se obtiene después de que los gases volátiles y el tar se extraen de los materiales carbónicos durante la etapa inicial de la combustión.
- 44 **CLINKER:** Producto intermedio generado por la cocción del crudo en hornos rotatorios hasta alcanzar una temperatura del material cercana a los 1450 °C y ser enfriado bruscamente. Componente principal del cemento común y del hormigón.
- 45 **HN:** Hule Natural ó Caucho Natural
- 46 **HULE SBR:** Hule de Estireno y Butadieno.

- 47 NEGRO DE CARBÓN:** Material producido por la combustión incompleta de los productos derivados del petróleo. Es una forma de carbono amorfo con una relación superficie-volumen extremadamente alta, por lo que es uno de los primeros nanomateriales ampliamente usados.
- 48 NEGRO DE HUMO:** Es un tipo de negro de carbón producido por la combustión incompleta de combustibles ricos en compuestos aromáticos. Se caracteriza por su amplia variedad de tamaños de partícula (hasta 100 nanómetros).
- 49 TAR:** Es un líquido negro viscoso derivado de la combustión de la materia orgánica, la mayor parte se produce del carbón mineral como subproducto de la producción de coque.
- 50 RCP:** Respiración Cardiopulmonar.
- 51 RADS:** Síndrome de malfuncionamiento reactivo de las vías respiratorias.

UNIDADES

- 52 °C/s:** Grado Centígrado/segundo
- 53 °C:** Grados Centígrados
- 54 BTU:** Unidad de energía inglesa equivalente a 1.055 Jules
- 55 Ha:** Hectárea (10'000 metros cuadrados)
- 56 kg:** kilogramo
- 57 kHz:** kiloHertz
- 58 m³:** metro cúbico
- 59 nm:** nanómetro (1/10⁹)
- 60 ppm:** Partes por millón (1/10⁶)
- 61 ppp:** Partes por peso (g/kg)
- 62 R.E.:** Relación de Equivalencia
- 63 V/h·lb:** Volt/ hora* libra
- 64 W/cm²:** Watt/centímetro cuadrado
- 65 µg/m³:** microgramos/metro cúbico (10⁻⁶gramos/metro cúbico)
- 66 µm:** micrómetro (1/10⁶)

RESUMEN

En México, las llantas desechadas representan poco más del 1% de los residuos sólidos generados anualmente (25 millones de unidades).

La Dirección General de Servicios Urbanos del Gobierno del Distrito Federal estima que 3'000 llantas son recogidas por el sistema de limpieza al día, donde su disposición final es el confinamiento en rellenos sanitarios, el resto de las llantas de desecho terminan abandonadas sin control en terrenos baldíos, ríos o la vía pública.

Apiladas al aire libre generan, focos de infección provocados por insectos y roedores que anidan en su interior, y riesgo de incendio, afectando al aire, al quemarlas en condiciones no controladas; al agua, al contaminar acuíferos y al suelo, al licuarse y filtrarse.

Existen diversos procesos de reciclaje de llantas para convertirlas en materia prima ó reutilizarlas en ingeniería civil ó como combustible alterno en hornos cementeros. Algunas de estas prácticas generan emisiones contaminantes, por lo que no existe un proceso limpio rentable aún. Los contaminantes emitidos son gases que se pueden controlar teniendo equipos especiales.

En el país se utilizan principalmente la incineración y la pirólisis en la industria cementera, la cual está regulada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

La trituración mecánica es un proceso utilizado recientemente en México y se sitúa como la mejor opción en cuanto a ecología, ya que se obtiene hule reciclado, que se utiliza como materia prima para nuevos objetos de hule y para llantas nuevas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un grave problema mundial en cuanto a la disposición y tratamiento de llantas de desecho generadas, como consecuencia, por el incremento en el uso de automóviles. (Ver **Tabla 1.1**)

Tabla 1.1 Llantas desechadas por país

País	Llantas desechadas (millones/año)
Dinamarca	21
México	25
Finlandia	25
Austria	45
Holanda	49
Bélgica	63
España	104
Italia	214
Reino Unido	240
Francia	271
Estados Unidos	280
Alemania	300

En México, como en la mayoría de los países latinoamericanos, aún no se cuenta con la infraestructura suficiente para manejar estos residuos. La disposición final de las llantas usadas generalmente es el confinamiento en rellenos sanitarios, apiladas al aire libre, generando problemas de salud y riesgo de incendio, afectando al aire al quemarlas en condiciones no controladas, al agua al contaminar acuíferos, al suelo al licuarse y filtrarse y generan focos de infección provocados por mosquitos y roedores que anidan en su interior.

Cuando existe un incendio en un basurero o relleno sanitario, se generan gases contaminantes a la atmósfera y la mayoría de las veces reaccionan con los gases atmosféricos pudiendo formar gases tóxicos para los seres vivos.

Al tener pilas de llantas en los rellenos, los contaminantes generados, su toxicidad y su duración aumentan demasiado, en particular existen dos ejemplos muy claros de lo difícil que es extinguirlos, el primero es un incendio ocurrido en Ontario, Canadá, en 1989, donde 14'000 llantas ardieron durante 17 días en lo que se logró extinguir, generando miles de compuestos tóxicos.

El segundo es un incendio en Virginia, Estados Unidos, durante el mes de Octubre del año 1983, se consumieron 9 millones de llantas antes de que lo apagarán en Julio de 1984.

Lemieux *et al.* (2004) realizó un análisis de las emisiones atmosféricas generadas en incendios al aire libre, en la **Tabla 1.2** se muestran algunos compuestos considerados contaminantes tóxicos por parte de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos), establecidos en el Acta de Aire limpio de 1990.

Tabla 1.2 Compuestos generados en incendio de llantas

Clase	Compuesto	Emisión (mg/kg quemado)	Numero CAS
COV's	Benceno	2180.55	71432
	Butadieno	234.6	106990
	Estireno	652.7	100425
	Tolueno	1367.75	108883
COSV'S	Difenoles	269.8	92524
	Fenol	533.05	108952
PAH's	Naftaleno	650.95	91203
	Fluoreno	223.65	-----
	Fenantreno	245	-----
	Antraceno	52.95	-----
	Fluoranteno	398.35	-----
	Pireno	92.75	-----
	Benzo(a)antraceno	92.3	-----
	Benzo[b]fluoranteno	78.9	-----
	Benzo(k)fluoranteno	86.85	-----
	Dibenz[a,h]antraceno	0.55	-----
	Benzo[g,h,i]pireno	112.7	-----
	Indeno[1,2,3-cd]pireno	68.55	-----

En México, desde la década de los 90s, se inició una reforma legislativa, cultural y de educación ambiental, ya que la atmósfera de las grandes ciudades como Guadalajara, Monterrey y el Área Metropolitana de la Ciudad de México, tenían altas concentraciones de contaminantes como el ozono, bióxido de carbono, etc. A través de estas reformas se logró una disminución de niveles de los contaminantes, aún así la Ciudad de México sigue siendo una de las más contaminadas del mundo.

La ASOCIACIÓN NACIONAL DE DISTRIBUIDORES DE LLANTAS Y PLANTAS RECICLADORAS A.C (ANDELLAC) estima que en la República Mexicana el 5% de las llantas de desecho se renueva, el 2% se utiliza como combustible alternativo, el 2% se encuentra en los centros de acopio y el 91% restante simplemente se abandona o se utiliza sin control ambiental.

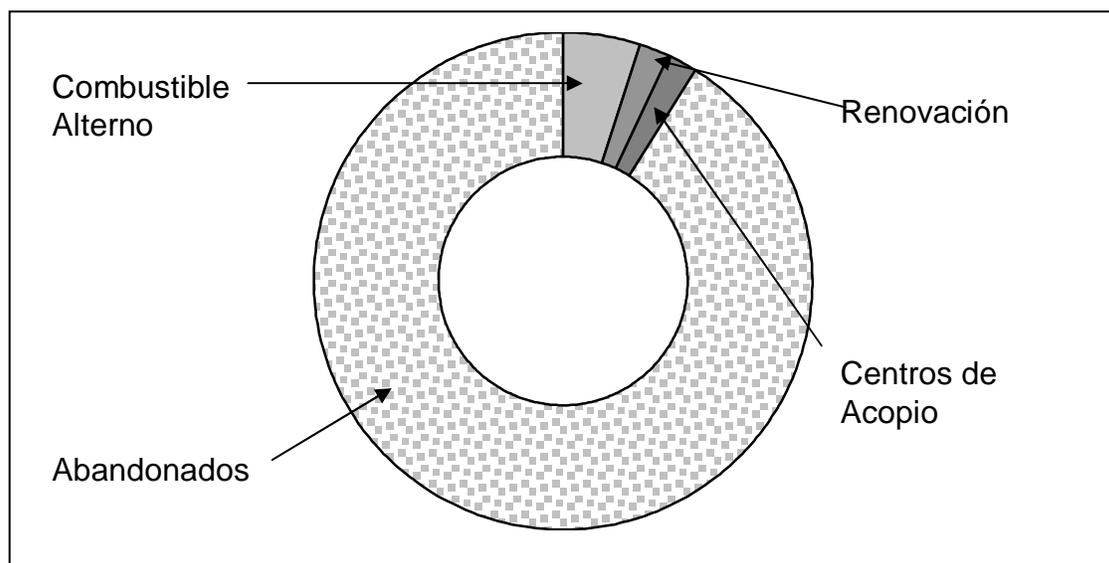


Figura 1.1 Destino de llantas usadas en México

Actualmente se investigan métodos “amables” al medio ambiente y rentables sin obtenerlos, por lo que se realizará una compilación de los procesos de reciclado y sus emisiones atmosféricas.

1.2 PLANTEAMIENTO

Conocer los diferentes procesos de reciclaje existentes para llantas y las emisiones atmosféricas debido a los procesos.

1.3 OBJETIVO

Conocer las causas y efectos de los contaminantes atmosféricos generados a partir del proceso de reciclaje y almacenamiento de llantas usadas.

Establecer el proceso menos contaminante y viable económicamente que podría establecerse en México.

1.4 METAS

Establecer la relación de emisiones atmosféricas con los diferentes procesos de reciclaje de llantas. (CO, PAH's, NO_x, SO₂, COV's, dioxinas, furanos, HCl, benceno, PCB's)

Conocer el inventario de emisiones generadas en los procesos de reciclaje utilizados en México (Incineración y pirólisis).

Estudiar los mecanismos alternativos que se han desarrollado al paso del tiempo para evitar la contaminación atmosférica.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2 ANTECEDENTES

El caucho (caa-o-chu: árbol lloroso) ó hule es una emulsión lechosa, conocida como látex, en la savia de varias plantas, aunque también puede ser producido artificialmente. (Bárcenas, 1999)

Las civilizaciones mesoamericanas utilizaron el caucho de la *Castilla elastica* (el hule), de la *Ipomoea alba* y de la *Hevea brasiliensis*.

Se usaba en el juego de pelota donde utilizaban pelotas de goma llamadas "tlachtli". Según Bernal Díaz del Castillo, los conquistadores españoles se asombraron tanto por los grandes saltos que lograban las pelotas de goma de los aztecas, que se preguntaron si las pelotas estaban encantadas por espíritus malignos. Los mayas también hacían un tipo de zapato de goma sumergiendo los pies en una mezcla de látex. Los indios peruanos lo utilizaban como impermeabilizante.

El caucho fue usado en otros contextos, como tiras para sostener instrumentos de piedra y metálicos a mangos de madera, en escudos de guerra, y como acolchado para los mangos de instrumentos.

Los antiguos Mesoamericanos no conocían la vulcanización pero desarrollaron métodos orgánicos de tratar el caucho con resultados similares, mezclando el látex crudo con varias savias y jugos de otras enredaderas.

Los españoles intentaron imitar los productos de los nativos (calzados, abrigos y capas impermeables) sin éxito. El caucho fue en Europa una mera curiosidad de museo durante los dos siglos posteriores.

En 1731, el gobierno francés envió en una expedición geográfica a Brasil, al geógrafo matemático Charles Marie de La Condamine, el cual en el año 1736, hizo llegar a Francia varios rollos de caucho crudo junto con una descripción de los productos que fabricaban con ello las tribus del valle del Amazonas. Esto reavivó el interés científico por el caucho y sus propiedades. En 1770, el químico británico

Joseph Priestley descubrió que frotando con caucho se borraban las marcas y trazos hechos con lápices, y de ahí surgió su nombre en inglés, rubber. La primera aplicación comercial del caucho la inició en 1791 el fabricante inglés Samuel Peal, que patentó un método para impermeabilizar tejidos, tratándolos con caucho disuelto en trementina. Charles Macintosh, químico e inventor británico, fundó en 1823 una fábrica en Glasgow para manufacturar tejidos impermeables y ropa para la lluvia, que lleva desde entonces su nombre.

En 1834, el químico alemán Ludersdorf y su colega estadounidense Hayward descubrieron que si le añadían azufre a la goma de caucho, reducían y eliminaban la pegajosidad de los artículos de caucho. En 1839, el inventor estadounidense Charles Goodyear, descubrió que cocinando caucho con azufre desaparecían las propiedades no deseables del caucho como su fragilidad a bajas temperaturas y pegajoso a altas temperaturas, en un proceso denominado vulcanización.

En 1906, el químico estadounidense George Oenslager, que trabajaba en el laboratorio investigando el uso de caucho de baja graduación en los procesos de fabricación, descubrió aceleradores orgánicos de la vulcanización, como la fenilamina y la tiocarbanilida (**Figura 2.1**) Estos aceleradores no sólo reducían en un 60-80% el tiempo necesario de calentamiento para la vulcanización, sino que además mejoraban la calidad del producto.

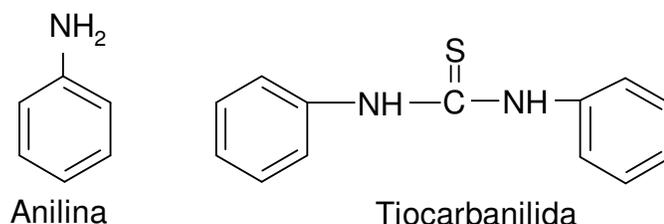


Figura 2.1 Fórmulas ramificadas de aceleradores orgánicos

Durante la I Guerra Mundial los químicos alemanes fabricaron caucho sintético a partir de dimetil-butadieno y para 1925 abarataron el proceso usando butadieno,

que a su vez se obtenía del butano y butileno, subproductos del petróleo que se convirtió en la principal materia prima para la obtención del caucho.

En 1927, se fundó en México la primera empresa llantera, Compañía Hulera Popo S.A., cuya demanda de materias primas se satisfacía mediante importaciones al igual que la producción de artículos manufacturados de hule que se empezaron a producir por esta época, posteriormente en la época de la Segunda Guerra Mundial, la industria hulera nacional observó un gran desarrollo como suministradora de llantas y artículos de hule para satisfacer la demanda externa.

En 1967, se establece la primera planta productora de hule sintético en México, Hules Mexicanos y posteriormente en 1968, Negromex inicia la producción de hules de polibutadieno. De esta época a la fecha la industria hulera nacional ha crecido constantemente contando actualmente con tres plantas productoras de hule SBR (Hule Estireno-Butadieno), polibutadieno y nitrilos, dos plantas productoras de negro de humo; ocho plantas de productos relacionados (plastificantes, aceleradores, vulcanizantes, etc.) y mas de 150 empresas huleras dedicadas a la fabricación de llantas, artefactos y productos industriales de hule.

La llanta ó neumático fue inventada en 1888 por el veterinario e inventor escocés John Boyd Dunlop, cuando su hijo pequeño conducía un triciclo con llantas de caucho macizo sobre el empedrado, observó que no iba muy rápido y que tampoco parecía muy cómodo. Intentando que su hijo se desplazara con más suavidad y pudiera maniobrar mejor, Dunlop cogió el triciclo, envolvió las ruedas con láminas finas de caucho, las pegó y las infló con una bomba para balones de fútbol. De ese modo creó el primer sistema de amortiguamiento por aire de la historia, y puso los cimientos del primer neumático propiamente dicho.

En México, actualmente existen cuatro empresas importantes en la producción de llantas, Compañía Hulera Tornel, Bridgestone/Firestone,

Continental Tire de México S.A. e Industrias Michelin; y tres importadoras, Goodyear Servicios Comerciales, Compañía Hulera Euzkadi y Pirelli.

El caucho vulcanizado, principal componente de las llantas vehiculares, es uno de los materiales que debido a su composición química es difícil de reciclar, no es biodegradable (tarda más de 100 años en descomponerse) y aunque como tal no se considera un residuo peligroso, tiene características químicas por las cuales se considera un riesgo ambiental y sanitario. (Ver **Tabla 2.1**).

Tabla 2.1 Análisis químico del neumático

Elemento	Porcentaje
Carbono (C)	70
Hidrógeno (H)	7
Azufre (S)	1-3
Cloro (Cl)	0,2...0,6
Hierro (Fe)	15
Óxido de Zinc (ZnO)	2
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	5
Cromo (Cr)	97 ppm
Níquel (Ni)	77ppm
Plomo (Pb)	60-760ppm
Cadmio	5-10ppm
Talio	0,2-0,3ppm

Fuente: Combustibles alternativos, Holderbank 1997

La llantas usadas varían en peso desde 9.5 kg hasta mas de 100 kg dependiendo del tipo de vehículo, su factor calorífico que tiene una llanta es de aproximadamente 15,000 BTU/lb (34,890 KJ/kg), por lo que se utilizan como combustible alterno en las industrias cementeras principalmente. (DeMarini *et al*, 1994; Lemieux *et al*, 2004; Semarnat, 2002)

En 2002, la ANDELLAC reporta la existencia en el Distrito Federal de 320 socios que se dedican a la distribución de llantas y 1,000 socios dedicados a la vulcanización de llantas. (Ver **Tabla 2.2**)

Tabla 2.2 Producción de llantas

Rama y clase de actividad	Unidades (cantidad)
Revitalización de llantas	688,563,000
Llantas revitalizadas	673,066,000
Otros productos de Hule	15,497,000
Producción de llantas y cámaras nuevas	36,147,000
Llantas neumáticas para automóviles y camionetas	14,527,000
Llantas neumáticas para camiones	1,693,000
Llantas neumáticas para otros usos	6,676,000
Cámaras neumáticas	10,830,000

FUENTE: XV Censo Industrial 1999, INEGI

2.1 CAUCHO NATURAL

2.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS

El caucho ó hule natural (HN) es una resina lechosa blanca o incolora conocida como látex que se obtiene de diversas especies vegetales, como *euforbias*, *moras*, *apiums* y *aclepias* siendo la principal la que se obtiene del árbol de familia *euforbia*, del género *Hevea* y de la especie *brasiliensis*, el cual es originario de la cuenca baja del río Amazonas en Brasil, desde donde se ha extendido su cultivo hacia las áreas tropicales de algunos países del Lejano Oriente, África y Latinoamérica. Otra planta productora de caucho es el árbol del hule, *Castilloa elastica*, originario de México (de ahí el nombre de hule). Contiene siempre una cantidad de impurezas que precipitan también en la coagulación del látex.

A la temperatura del aire líquido, alrededor de $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$, el caucho puro es un sólido duro y transparente; de 0 a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ es frágil y opaco, por encima de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ se vuelve blando, flexible y translúcido. (Merck, 2006)

Al amasarlo mecánicamente, o al calentarlo por encima de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso; a temperaturas de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ o superiores se descompone, por lo que hay que vulcanizarlo mezclándolo con azufre y otros componentes para mejorar su resistencia y dureza sin perder elasticidad.

Las características físicas del HN como son su elasticidad, fortaleza y resistencia al desgaste, lo hacen insustituible y por lo tanto, garantizan una demanda natural o propia, no influida por la competencia del hule sintético.

Se considera elastómero debido a que bajo la influencia de una pequeña fuerza es capaz de deformarse a casi el 100% de su longitud original sin romperse, sin la influencia externa el material tiende a retornar espontáneamente a su longitud original.

2.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

El compuesto de caucho más simple es el isopreno ó 2-metilbutadieno, cuya fórmula química es C₅H₈.



Figura 2.2 Fórmulas ramificadas del caucho

El caucho puro es insoluble en agua, álcalis o ácidos débiles, y soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos clorados y disulfuro de carbono. Con agentes oxidantes químicos se oxida rápidamente, pero con el oxígeno atmosférico se oxida lentamente.

Las cadenas carbono-hidrógeno que componen el HN consisten en 99.99% de 1, 4 cis-poliisopreno lineal, como se presenta en la **Figura 2.3**

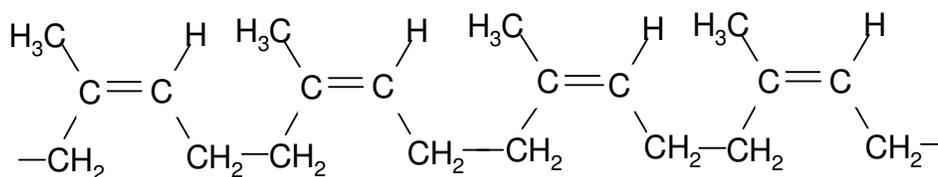


Figura 2.3 Fórmula ramificada del Caucho Natural

El peso molecular promedio en número del poliisopreno en HN va de 1x10⁵ a 3x10⁶ g/mol, con una distribución de peso molecular relativamente amplia. Esto corresponde alrededor de 1500 a 45000 unidades de isopreno por cadena polimérica.

2.1.3 PROCESAMIENTO DEL HULE NATURAL

Para recolectar el hule de los árboles, se realiza un corte diagonal hacia abajo en la corteza de una extensión de un tercio o de la mitad de la circunferencia del tronco. El caucho exuda desde el corte y se recoge en un recipiente. La cantidad de látex que se extrae de cada corte suele ser de unos 30 mL, después se arranca un trozo de corteza de la base del tronco para volver a tapar el corte.

El látex extraído se tamiza, se diluye en agua y se trata con ácido para que las partículas en suspensión del caucho en el hule se aglutinen. Se prensa con unos rodillos para darle forma de capas de caucho de un espesor de 0,6 cm, y se seca al aire o con humo.

El caucho bruto se mezcla con sustancias que modifican sus características., como los aditivos que estiran el caucho pero no lo endurecen (carbonato de calcio y la baritina o sulfato de bario); los aditivos reforzantes se añaden para dar dureza al producto final (negro de humo, óxido de cinc, carbonato de magnesio y arcillas); los pigmentos (óxido de cinc, litopón y tintes orgánicos) y ablandadores, que se usan cuando el caucho es demasiado rígido para mezclarse con otras sustancias, como derivados del petróleo (aceites y ceras), la brea de pino o los ácidos grasos. (Ver **Figura 2.4**)

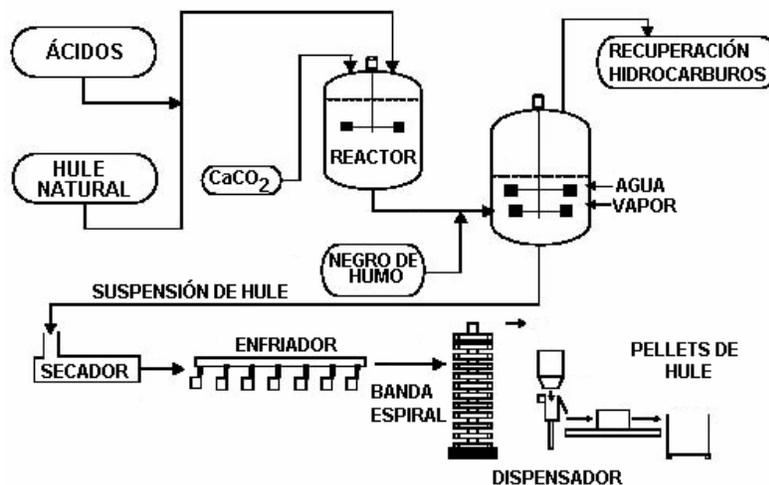


Figura 2.4 Procesamiento del Hule Natural

2.2 CAUCHO SINTÉTICO

2.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS

Se llama caucho sintético a toda sustancia elaborada artificialmente que se parezca al caucho natural, en la **Tabla 2.3** se muestran los principales tipos de cauchos sintéticos. Se obtienen por reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados.

Tabla 2.3 Principales hules sintéticos

Nombre	Siglas	Monómeros	Composición
Polibutadieno	BR	Butadieno	75% butadieno 25% estireno
Buna S	SBR	Butadieno y Estireno	15% butadieno 85% estireno
Buna N	NBR	Butadieno y Acrilonitrilo	60-80% butadieno 40-20% acrilonitrilo
Neopreno	CR	Cloropreno	-----
Butilo	IIR	Isobutileno Isopreno	97-98% isobutileno 3 - 2 % isopreno

Las propiedades de los diferentes cauchos artificiales están determinadas por la naturaleza de los grupos sustituyentes.

El polibutadieno es el polímero más importante para el procesamiento del hule sintético. Este elastómero es un polímero con propiedades muy semejantes a las del hule natural y se vende como sustituto de este último. (CHOW, 2007)

La industria llantera es la que emplea el 75% de polibutadieno. En las llantas, especialmente en la superficie ó banda de rodadura, el polibutadieno tiene un lugar importante, ya que provee alta resistencia al desgaste y menos fricción en el pavimento que cualquier otro elastómero, su principal inconveniente se presenta cuando el piso está mojado. Para eliminar este obstáculo, se suele mezclar el polibutadieno con Hule Estireno-Butadieno (SBR) o con HN.

2.2.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

La formación de los distintos cauchos sintéticos se basa en la polimerización del butadieno o de homólogos (isopreno) o derivados (cloropreno) que tiene la misma estructura. En la **Figura 2.5** se muestran las fórmulas químicas de las principales materias primas para la elaboración de los diferentes cauchos que se manejan en la actualidad.

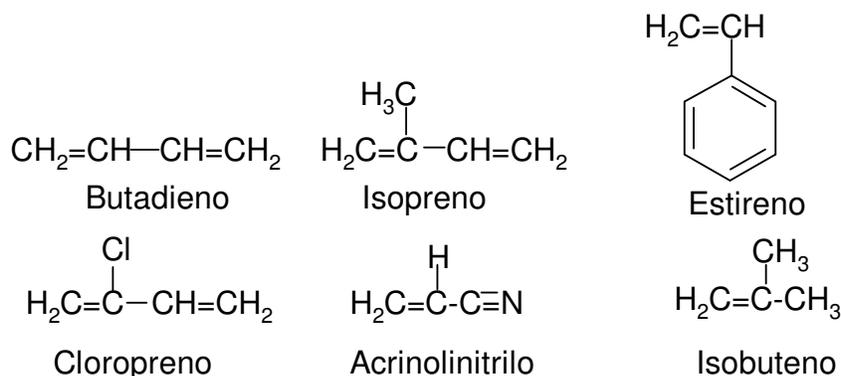


Figura 2.5 Materias Primas Del Caucho Sintético

Se conocen gran variedad de cauchos sintéticos, algunos de cualidades mecánicas mejores que el HN. El buna 85 esta formado por polimerización del butadieno, el "neopreno" por polimerización del cloropreno, el "perbunan N" a partir del butadieno y el cianuro de vinilo, el "buna S" a partir del butadieno y el estírol, así como otros muchos de composición más o menos conocidas y patentados con nombres que no guardan relación con los monómeros que los integran ("ameripol", "koroseal", "thincol", "chemigum", etc.).

2.3 CAUCHO SBR (HULE ESTIRENO-BUTADIENO)

De los elastómeros sintéticos el más importante por ser el más utilizado a nivel mundial es el SBR un copolímero del 1,3-Butadieno y estireno que se produce por medio de radicales libres. (**Figura 2.6**)

Se puede clasificar en dos tipos: calientes y fríos, según las temperaturas de polimerización. Además, se subdividen en bajo, mediano y alto, de acuerdo al contenido de sólidos.

Los SBR calientes se polimerizan a 49-66 °C y se fabrican principalmente con un contenido mediano de sólidos (42-50% en peso). Los de alto contenido de sólidos (60-70% en peso) se usan para aplicaciones especiales, como bases de injertos para polimerizaciones a fin de obtener plásticos con alta resistencia al impacto. Los de bajo contenido de sólidos (27%) se emplean en la fabricación de goma de mascar o chicle.

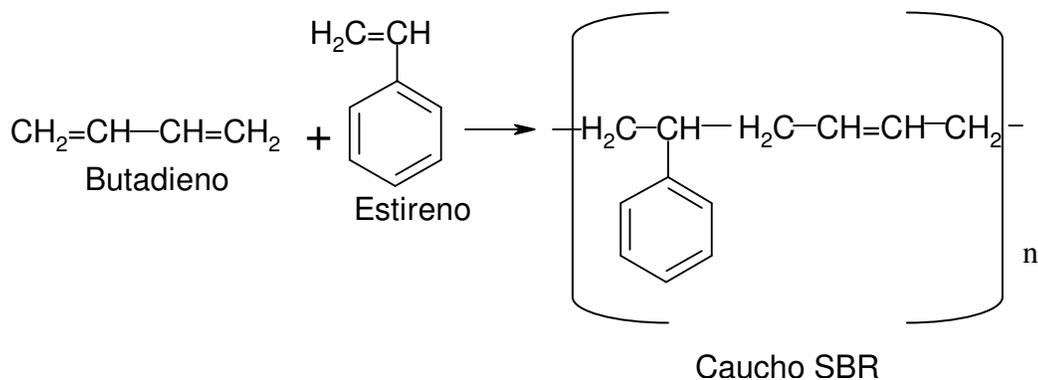


Figura 2.6 Fórmula del caucho SBR

2.3.1 PROCESADO DEL HULE SBR

El proceso de producción de hule sintético SBR (**Figura 2.7**) en forma continua comprende las siguientes fases: se carga el monómero butadieno estireno en una emulsión ya preparada o en una solución de ciclohexano y se deposita en reactores de polimerización junto con agentes activadores, modificadores, un indicador y un catalizador. Al término de esta reacción se descargan los reactores en tanques de mezclado; esta emulsión (látex) se somete a coagulación, en donde se separan el agua y los grumos de hule; después en el proceso de solución, se recupera el solvente en varias etapas. Estos grumos se secan y se comprimen para darles su forma final en pacas, se envuelven y se guardan en cajas de cartón y de madera para su distribución final. (Diario Oficial, 17/05/2006)

La industria llantera utiliza el 83.3%, el sector renovador de llantas con el 8.8%, la industria del calzado con el 4.7% y el resto del sector industrial consume el 2.9% del hule sintético SBR que se consume en el país.

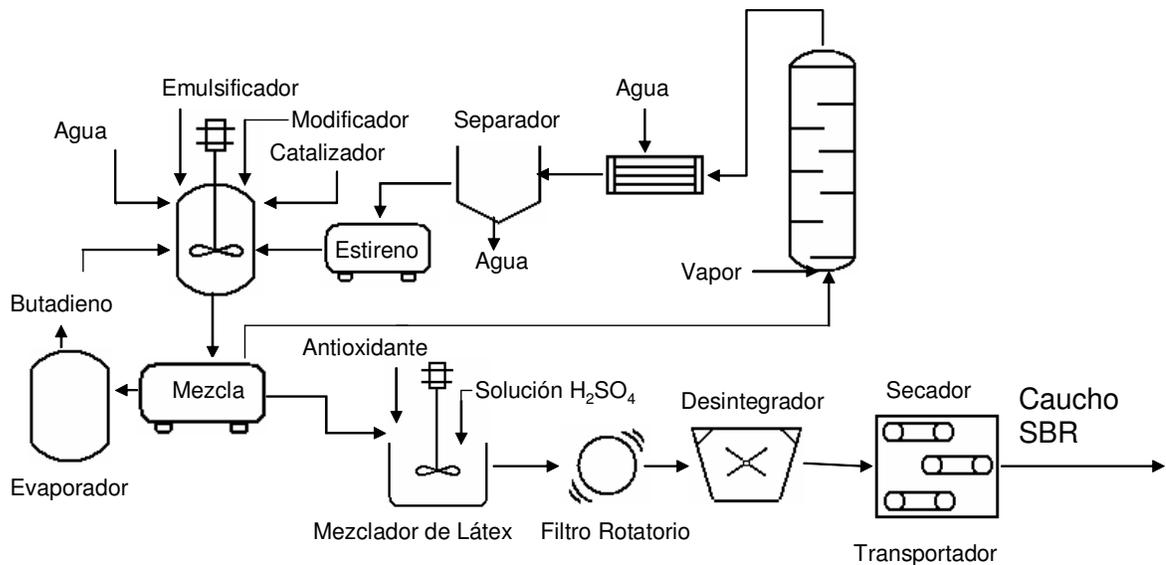


Figura 2.7 Procesamiento del hule SBR

2.4 VULCANIZACIÓN

Los primeros usos del caucho natural revelaron algunas limitaciones, se volvía duro y frágil a bajas temperaturas y blando y pegajoso a altas temperaturas. Gracias a la vulcanización se vencieron estos problemas y se mejoró el rendimiento del material aumentando así la utilidad del mismo.

La vulcanización es un proceso mediante el cual se calienta el caucho crudo en presencia de azufre, con el fin de volverlo más duro y resistente al calor. Fue descubierto por Charles Goodyear en 1839, por accidente, al volcar un recipiente de azufre en una sartén que contenía látex. Este proceso era todo un avance en el tratamiento del HN. La **Tabla 2.4** muestra la mezcla y el tiempo de curado necesario para el proceso.

Tabla 2.4 Primera Mezcla de Vulcanización

Caucho natural	100 ppp (partes por peso, g/kg)
Azufre	8 ppp
Curado	5 horas a 142 °C

De acuerdo con los estándares actuales, las propiedades de este compuesto serían bastante deficientes, en su tiempo sin embargo, representó un avance considerable, la siguiente mejora fue la introducción del óxido de zinc como activador. Esta sustancia forma un intermediario con el azufre y esto acelera la reacción. (**Tabla 2.5**)

Tabla 2.5 Adición de Aditivos

Caucho natural	100 ppp
Azufre	8 ppp
Óxido de Zinc (ZnO)	5 ppp
Curado:	3 horas a 142 °C

Posteriormente se utilizaron aceleradores como la anilina, que era tóxica, el mercaptobenzotiazol (**Figura 2.8**), que forma un complejo con el azufre y el óxido de zinc mejorando el rendimiento de la reacción ya que disminuye la distancia de los enlaces de azufre, el tiempo de curado y aumenta la vida del compuesto antes de curarse, y el uso de ácidos grasos naturales (ácido esteárico) para mantener un ambiente ácido.

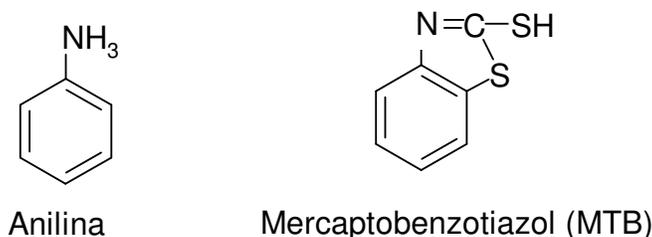


Figura 2.8 Aceleradores

Un problema adicional fue la oxidación de la mezcla durante su elaboración, estas se hacían a la intemperie en un molino de dos rodillos, el cual exponía constantemente la superficie al ataque del oxígeno atmosférico, a temperatura elevada, unos 60 a 80°C. Se añadieron antioxidantes como fenoles y aminas con sustituyentes voluminosos en el anillo aromático que electrónicamente y físicamente limitan sus propiedades. Estos antioxidantes interrumpen la reacción en cadena por radicales libres, mediante la cual se lleva a cabo la degradación oxidativa de los polímeros, incluyendo a los cauchos. En la **Tabla 2.6** se muestra la mezcla vulcanizadora actual.

Tabla 2.6 Mezcla Vulcanizadora Actual

Caucho natural	100 ppp
Azufre	3 ppp
Óxido de Zinc (ZnO)	5 ppp
Ácido esteárico	1 ppp
Mercaptobenzotiazol	1 ppp
Antioxidante	1 ppp

Este proceso requiere de calor y presión, por lo que la temperatura se mantiene alrededor de los 150 °C para que se lleve a cabo rápida y correctamente; la presión es necesaria para contener los materiales volátiles que se desprenden durante la reacción, sin ella el producto que se obtiene es poroso y se gasifica.

El producto se elabora a menudo a partir de muchos componentes diferentes, una llanta conteniendo más de 50 componentes individuales. Todos estos se ensamblan antes de que la pieza completa se preme en el molde, El tiempo de curado varía de entre 20 y 30 minutos, se moldea de manera individual.

La Sociedad Química Americana utiliza como formulación de referencia la primera columna de la **Tabla 2.7**.

Tabla 2.7 Formulaciones para la vulcanización de diferentes cauchos

Ingredientes	Caucho Natural (ppcc)*			Caucho SBR (ppcc)		
	6	5	5	3	4	4
Óxido de Zinc (ZnO)	6	5	5	3	4	4
Ácido esteárico	0.5	1	0.5	3	2	2
TMTD (Tiuramdisulfuros)	---	---	0.04	---	---	---
MBT (Mercaptobenzotianol)	0.5	---	---	---	---	---
MBTS (Disulfuro de dibenzotiazilo)	---	---	0.25	---	1.2	---
DPG(Difenilguanidina)	---	---	---	---	---	0.8
CBS (Sulfenamida de n-ciclohexilbenzotiazilo)	---	0.4	---	2	---	1
TMTM(Monosulfuros)	---	---	---	---	0.15	---
Azufre (S)	3.5	3	2.5	1	1	1.75
Tiempo de Curado (minutos)	40	30	20	30	25	25
Temperatura de Curado (°C)	141	141	141	153	153	153

Fuente: Procesamiento de plásticos

*Las formulaciones se expresan como partes por ciento de caucho

El proceso de vulcanización hace uso de un fenómeno químico el cual tiene que ver con que el azufre es un material raro, que en las circunstancias correctas, formará cadenas de sus propios átomos al igual que el carbono, debido a los dobles enlaces de la molécula del caucho que permiten la formación de puentes de azufre entre cadenas diferentes. Los polímeros lineales paralelos cercanos constituyen puentes de entrecruzamiento entre sí. A lo largo de la molécula del caucho, hay un número de sitios que son atractivos para los átomos de azufre. Son los llamados sitios de cura. En cada sitio de cura, un átomo de azufre se puede unir a sí mismo, y a partir de allí la cadena de átomos de azufre puede crecer hasta que alcance el sitio de cura de otra molécula. Estos puentes de azufre son usualmente de 2 a 10 átomos de largo, en contraste con los polímeros más comunes en los que la columna vertebral de carbonos es de varios miles de veces de larga. Durante la vulcanización, los anillos del S₈ se abren y se combinan con los dobles enlaces de las moléculas de caucho formando puentes de cadenas de azufre de una molécula de caucho a otra, dando lugar a una trama total.

Como se puede observar en la **Figura 2.9**, en el producto las moléculas elásticas de caucho quedan unidas entre sí a una mayor o menor extensión, lo que forma un caucho más duro, estable, durable y resistente al ataque químico sin perder la elasticidad natural.

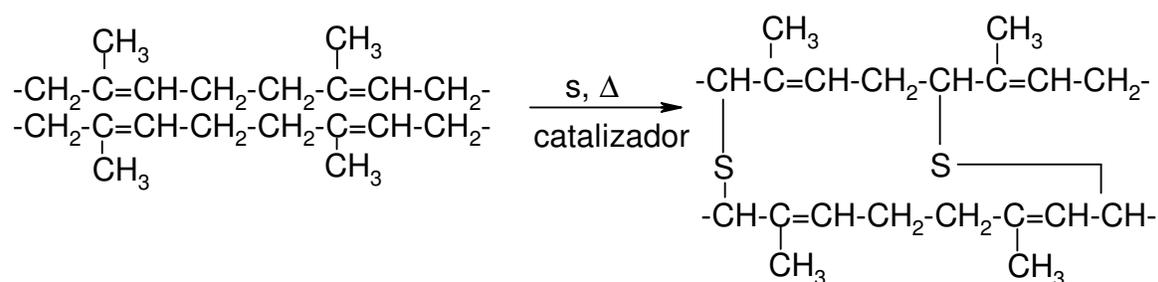


Figura 2.9 Química de la Vulcanización

Se considera un proceso de cura irreversible y debe ser fuertemente contrastado con los procesos termoplásticos que caracterizan el comportamiento de la vasta mayoría de los polímeros modernos.

Este proceso irreversible define a los cauchos curados como materiales termorígidos (no se derriten con el calor) y los saca de la categoría de los termoplásticos.

Usualmente el entrecruzamiento químico es realizado con azufre, pero existen otras tecnologías como los sistemas basados en peróxidos. Se suelen usar en combinación con agentes aceleradores y retardadores.

El caucho vulcanizado tiene más elasticidad y mayor resistencia a los cambios de temperatura que el no vulcanizado; además es impermeable a los gases y resistente a la abrasión, a los agentes químicos, al calor y a la electricidad. También posee un alto coeficiente de rozamiento en superficies secas y un bajo coeficiente de rozamiento en superficies mojadas por agua.

2.4.1 TIPOS DE VULCANIZACIÓN

2.4.1.1 LÍNEA DE VULCANIZACIÓN A BAÑO DE SALES

Es un proceso que se ha ido desarrollando, innovando y actualizando en los últimos años, se ha convertido en uno de los sistemas de vulcanización más productivos y de uso universal que se utiliza actualmente en el mercado.

El proceso se lleva a cabo mediante un sistema de desplazamiento de bandas, una línea de impregnación de sales, un sistema de desplazamiento de rodillos, una línea de sacudido y un ventilador para la limpieza de perfiles.

El sistema de prelimpieza reduce significativamente los residuos de sal y a su vez permite una mayor eficiencia en los costos del proceso.

Se tiene también un sistema de recuperación de sales para economizar y maximizar la eficiencia del vulcanizado.

2.4.1.2 VULCANIZACIÓN POR MICROONDAS

La vulcanización por microondas en combinación túneles por aire caliente es usada especialmente en la vulcanización de perfiles de goma gigantes. Debido a la sofisticada construcción del túnel, la distribución del calor al producto es perfectamente uniforme.

2.4.1.3 VULCANIZACIÓN CON RADIACIÓN POR INFRARROJOS

La vulcanización por infrarrojo se lleva a cabo por radiadores de alto rendimiento, la radiación por infrarrojos penetra profundamente en el caucho lo cual permite una rápida vulcanización debido a una mejor distribución de la temperatura, incremento en la productividad, estabilidad de la forma y alta calidad del producto. El diseño del reflector permite reducir el consumo de energía y la limpieza de la línea mejora.

2.5 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE HULE

El hule como producto a nivel internacional tiene una producción de 6'340'000 toneladas de hule seco, en una superficie de 8.5 millones de Ha. (746 kg/Ha.), donde Malasia, Tailandia e Indonesia aportan el 25.8, 25.1 y 23.5% de la producción mundial respectivamente. (Ver **Tabla 2.8**)

Nótese que los valores de los años 2005 y 2006 son anuales, los valores del año en curso son del primer cuatrimestre.

Tabla 2.8 Producción Mundial de HN

Año	2005	2006	2007
América Latina	200	203	57
África	411	421	109
Asia	8377	9316	2268
TOTAL (miles de toneladas)	8882	9676	2325

De acuerdo con la **Tabla 2.9** tenemos que los principales consumidores mundiales son Estados Unidos con el 30.3%, China con el 23.2%, Japón 21.5% e India con el 15%. (SAGARPA, 2003)

Tabla2.9 Consumo de HN

Año	2005	2006	2007
Norteamérica	1316	1148	290
Latinoamérica	538	520	133
Unión Europea	1318	1280	363
Resto de Europa	227	177	47
África	120	118	32
Asia/Oceanía	5563	5962	1534
TOTAL (miles de toneladas)	9082	9224	2399

Fuente: Rubber Statistical Bulletin

En México los estados productores de hule natural se encuentran en el sureste, siendo los más importantes Oaxaca, Veracruz, Tabasco y Chiapas.

Las empresas llanteras son las que mayor cantidad de hule demandan, en nuestro país (GoodYear 36 %, Euzkadi 22% y Uniroyal/Michelin con 12% son las principales empresas, que consumen el 70% del total).

La producción mundial de hule sintético es mucho mayor, ya que requiere solamente de un proceso industrial y no se debe esperar a la cosecha. Como se puede observar en la **Tabla 2.10**, los mayores productores de este hule son Asia con el 42%, la Unión Europea con el 21% y Norteamérica con el 20%.

El consumo mundial de este tipo de hule se da mayoritariamente en Asia seguida de la Unión Europea y Norteamérica. (Ver **Tabla 2.11**)

Tabla 2.10 Producción de Hule Sintético

Año	2005	2006	2007
América del Norte	2430	2500	645
Latinoamérica	653	665	161
Unión Europea	2696	2709	648
Resto de Europa	1233	1301	344
África	78	67	13
Asia/Oceanía	5019	5282	1379
TOTAL (miles de Toneladas)	12155	12525	3190

Tabla 2.11 Consumo de Hule Sintético

Año	2005	2006	2007
América del Norte	2228	2032	472
Latinoamérica	766	805	198
Unión Europea	2518	2508	649
Resto de Europa	932	913	210
África	104	101	23
Asia/Oceanía	5242	5691	1500
TOTAL (miles de Toneladas)	11895	12183	3080

Fuente: Rubber Statistical Bulletin

2.6 MANUFACTURA E INGENIERÍA DE LAS LLANTAS

Una llanta (ver **Figura 2.10**) es un elemento elástico de las ruedas de los vehículos con una envoltura que contiene aire a presión, la cual tiene por objeto soportar las cargas que actúan sobre el vehículo y transmitir al terreno las fuerzas necesarias para el movimiento. Está constituida por hule vulcanizado y otros materiales que sirven para reforzarla.

La matriz más comúnmente usada es SBR o una mezcla de HN y SBR, sumados a estos compuestos de hule, las llantas también contienen un relleno reforzado (negro de humo para fortalecer el hule y ayuda a resistir la abrasión), fibras reforzadoras textiles o de acero, normalmente como cordones, que se usan para fortalecer y como componente de la tensión en las llantas. Utilizando, para este propósito, desde algodón natural y rayón hasta fibras sintéticas de nylon y poliéster.

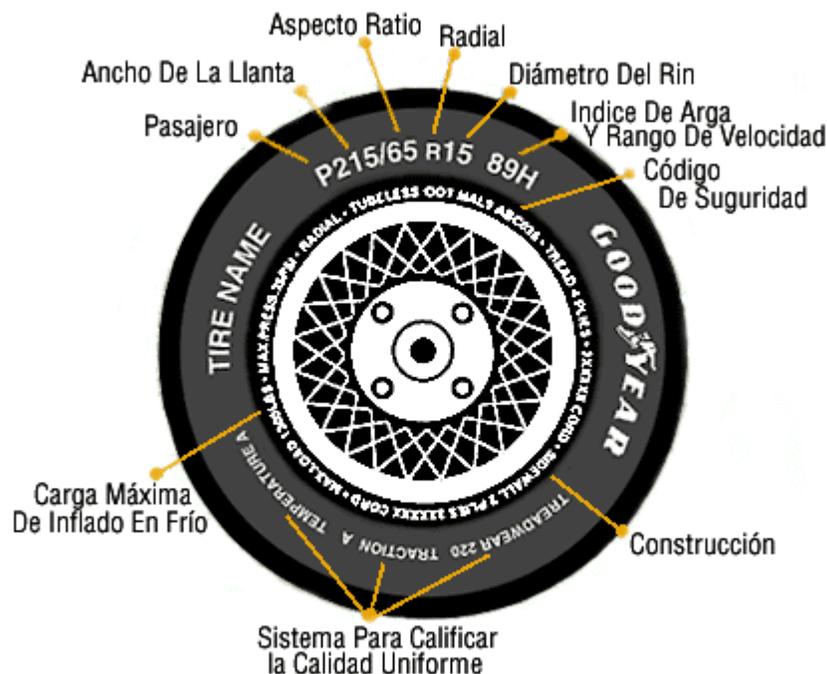


Figura 2.10 Información en una llanta

Desde la década de los 90, el uso de cuerdas de acero se incrementó sustancialmente, ocupando cerca del 50% de las fibras reforzadoras.

Para producir una llanta se utilizan como materia prima compuestos de hule (banda, paredes y cejas) que representan el 89% de la llanta, materiales textiles recubiertos de hule (nylon, poliéster, rayón) representando el 8% y alambre de acero para dar firmeza y sostén a las capas representando el 3% de la composición total de la llanta. (Ver **Tabla 2.12** y **Tabla 2.13**)

Las llantas de los automóviles de pasajeros se fabrican con una mezcla de butadieno con SBR, mientras que las llantas de los camiones por lo general están constituidas por mezclas de polibutadieno con HN.

Las llantas de camioneta pueden tener una carcasa adicional, un cinturón de acero más fuerte y/o un talón mayor con más espesor de caucho en la banda lateral, por lo que son más pesadas.

Cuando la vida útil de la llanta termina debido al desgaste físico y químico del hule, las cantidades de la composición varían, obteniéndose así un menor peso y menor composición de la misma. En total se obtiene una pérdida de peso en promedio de 2 kg.

Tabla 2.12 Composición física de las llantas

MATERIAL	COMPOSICION (%)	
	CAMIONES	AUTOMOVILES
Caucho natural	27	14
Caucho sintético	14	27
Negro de carbón	18	28
Acero	15	15
Protegido, rellenos	16	16
Peso de llanta nueva	54.48 kg	11.35 kg
Peso de llanta usada	45.40 kg	9.08 kg

Fuente: Secretaria del Medio Ambiente. Llantas Usadas

Tabla 2.13 Composición química de las llantas

COMPONENTE	PORCENTAJE
SBR	62.1
Negro carbono	31.0
Aceites	1.9
Óxido de Zinc	1.9
Ácido Esteárico	1.2
Azufre	1.1
Aditivos	0.7

Fuentes: Lehmann 1998, Teng 1995, Williams 1990

Los primeros automóviles solían usar ruedas con cubiertas hechas de goma que tenía un color blanquecino debido al caucho con que estaban hechas. En 1885 la compañía de llantas Goodrich decidió fabricar ruedas negras para evitar que se notara la suciedad, por lo que añadió negro de humo para que el caucho se tiñera de color negro. Para sorpresa de esta compañía se descubrió que las ruedas así fabricadas eran hasta 5 veces más resistentes que las ruedas no coloreadas, por lo que en 1910, esta compañía introdujo su uso en la fabricación de neumáticos. Las llantas de hoy en día son mucho más sofisticadas que las primeras llantas negras, con docenas de capas y refuerzos de acero, pero el negro de humo sigue siendo uno de los componentes principales y una de las partes más importantes en el diseño de un neumático. (**Figura 2.11**)



Figura 2.11 Diseños

Las llantas radiales son las más avanzadas y las más populares. Las capas están dispuestas en forma radial, esto es, paralelas las unas a las otras, en un ángulo de

90 grados a la circunferencia de la llanta. Los cinturones de soporte son colocados sobre las capas a lo largo de la periferia de la llanta. Estos cinturones de soporte pueden ser fabricados de acero. Las llantas radiales son las más comunes, tienen menor resistencia al rodamiento que otros tipos de llantas y, por lo tanto, mejoran el rendimiento de combustible, la maniobrabilidad del vehículo y el diseño de la banda de rodadura; debido a la construcción radial, ofrecen mejor comportamiento bajo condiciones adversas de manejo. (Ver **Figura 2.12**)



Figura 2.12 Llanta radial y convencional

Las llantas radiales ahorradoras de combustible, están diseñadas para ser infladas considerablemente más que las llantas radiales comunes. Este incremento de presión hace a la llanta más dura y por lo tanto reduce la resistencia al rodamiento y el consumo de combustible. Muchos vehículos nuevos son equipados con este nuevo tipo de llanta (como equipo de serie) que le ahorran combustible.

Las llantas radiales para toda temporada ofrecen lo último en tecnología en llantas. Son diseñadas para comportarse adecuadamente bajo todas las condiciones de manejo, son generalmente del tipo ahorradoras de combustible y representan una buena inversión para mucha gente, porque no es necesario cambiarlas en invierno o en verano. Sin embargo, debido a que el diseño del piso de las llantas radiales para toda temporada es una combinación entre un diseño para verano y para invierno, el comportamiento bajo condiciones adversas de

manejo será ligeramente más pobre que aquellas llantas diseñadas para esas condiciones.

Las llantas convencionales y con cinturón aún están disponibles.

Se deben tomar precauciones para no mezclar llantas de diferentes diseños debido a la gran diferencia de comportamiento entre radiales y las convencionales, el colocar dos tipos diferentes de llantas en el mismo extremo del vehículo puede ser peligroso.

La presión en la llanta es crítica. La baja presión reduce la vida de una llanta considerablemente, incrementa el consumo de combustible debido a la mayor resistencia al rodamiento y puede ser peligrosa. (Ver **Figura 2.13**)



Figura 2.13 Inflado de llantas

2.6.1 COMPORTAMIENTO DE LAS LLANTAS

El propósito primario del diseño y dibujo de la llanta es la tracción, realza su habilidad para el manejo y frenado. El diseño es, básicamente, la división o separación de hule liso en elementos más pequeños arreglados en un patrón simétrico repetitivo de huecos, costillas, ranuras y surcos. Una vez que las dimensiones de la superficie son determinadas, la profundidad es considerada en relación con el diseño y sus elementos entre sí.

Existen tres diseños básicos (Ver **Figura 2.14**); el primero, con elementos de diseño de costilla orientados circunferencialmente, es el tipo mas común y provee en promedio buen servicio para todas las posiciones de la llanta, sin embargo se utiliza básicamente para llantas de coches de pasajeros y llantas delanteras en camiones.

El segundo diseño es el de costilla cruzada, ofrece el mejor desempeño en el manejo de ejes donde la tracción delantera es un requisito primario.

La pared lateral de una llanta protege la carcasa de rasguños y roturas, debido al diseño y espesor, tiene valor estético y es utilizado para la identificación de la llanta.

El tercer diseño es el que ofrece mejor tracción en vehículos todo terreno y caminos lodosos.

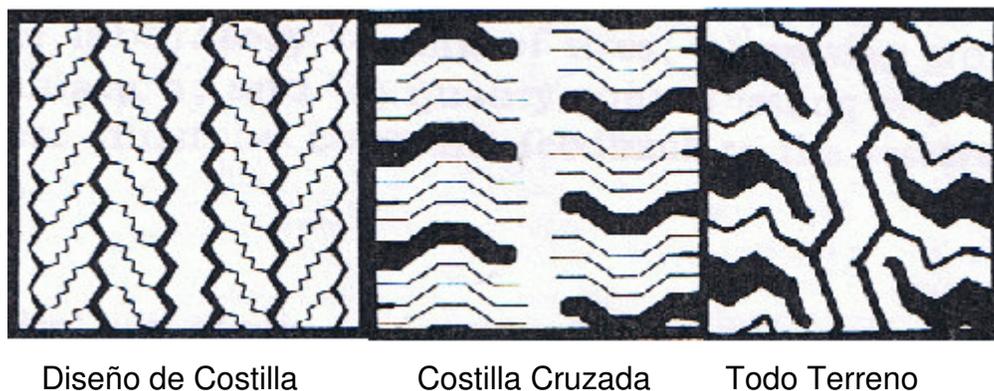


Figura 2.14 Diseños Básicos de Llantas

2.6.2 PROBLEMAS DE RECICLAJE

El reciclaje es un término empleado de manera general para describir el proceso de utilización de partes o elementos de un artículo que todavía pueden ser usados, a pesar de pertenecer a algo que ya llegó al final de su vida útil.

Reciclar es la acción de volver a introducir en el ciclo de producción y consumo productos materiales obtenidos de residuos. También se refiere al conjunto de actividades que pretenden reutilizar partes de artículos que en su conjunto han llegado al término de su vida útil, pero que admiten un uso adicional para alguno de sus componentes o elementos.

Uno de los problemas más grandes de contaminación en el mundo lo ocasionan las llantas de desecho, según la agencia informativa IPS, entre 3'000 y 4'000 millones de llantas se encontraban desechados de forma inadecuada en todo el mundo a finales del pasado siglo XX. Actualmente, Estados Unidos y la Unión Europea concentran más de la mitad de esa producción.

Cuando las llantas son enviadas a los tiraderos, forman un conglomerado de miles de toneladas que al permanecer a la intemperie representa una amenaza en materia de incendios, afectan el suelo y los mantos freáticos y son potenciales focos de propagación de enfermedades como el dengue, el paludismo, el hantavirus, la rabia y el virus del Nilo.

Los tiraderos abiertos con mayor concentración de llantas se encuentran en la frontera norte del país, por ejemplo en el Cerro del Centinela (Mexicali, BCN) con 4 millones de llantas almacenadas, en el Ejido Lázaro Cárdenas (Tijuana, BCN) con 3 millones de llantas, Ciudad Juárez (Chihuahua) con 7 millones de llantas, Matamoros (Tamaulipas) con 800 mil llantas y Reynosa (Tamaulipas) con 500 mil llantas.

Se calcula que cuatro millones se concentran en el Distrito Federal y Área Metropolitana dentro del bordo de Xochiaca ó Poniente, en los rellenos de San

Juan de Aragón y Santa Catarina hay unas 500 mil llantas inservibles que en el mejor de los casos se vuelven a vender como llantas usadas ó “gallitos” a los automovilistas y vulcanizadoras, o bien son quemadas a cielo abierto para no ocupar más espacio, lo que constituye un gravísimo problema de contaminación.

Las llantas usadas, generalmente, se desechan contratando un servicio de recolección particular que las transporta hasta un almacén temporal para enviarlas posteriormente a las empresas que las utilizan como combustible alterno.

Los generadores pequeños utilizan el servicio de recolección público de residuos para desecharlas y se transportan hasta plantas de selección y aprovechamiento a estaciones de transferencia de residuos o al sitio de disposición final, ó se tiran indiscriminadamente en la vía pública y basureros a cielo abierto que deriva en una disposición inapropiada y acumulación no controlada. El municipio de Ciudad Juárez enfrenta un problema de salud pública debido a los aproximadamente 100 millones de llantas usadas tiradas en el desierto.

Para el almacenamiento al aire libre existen dos problemas asociados, uno es el riesgo de incendio donde se realiza una combustión incontrolada de llantas a temperatura relativamente bajas (menos de 1092°C) y se producen cantidades importantes de hidrocarburos no quemados (humo negro y espeso) consideradas emisiones nocivas para la atmósfera.

Las partículas generadas más importantes son el monóxido de carbono (CO); dióxido de azufre (SO₂); óxidos de nitrógeno (NO_x); bifenilos policlorados (PCB's); dioxinas; furanos; cloruro de hidrógeno (HCl); benceno; compuestos orgánicos volátiles (COV's); hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH's).

El segundo problema se refiere a la proliferación de fauna nociva, la cual se aplica a aquellas especies animales que incrementan su población hasta convertirse en plaga causando enfermedades infecto-contagiosas.

Las llantas amontonadas actúan como depósitos de agua y absorben la luz del sol por lo que crean un ambiente propicio para la reproducción de moscas, cucarachas, ácaros, arañas y mosquitos transmisores de enfermedades como fiebre amarilla, encefalitis y dengue.

Actúan también como zona de reproducción de roedores que producen daños por mordedura e infecciones domésticas, son perjudiciales en zonas de agricultura y transmiten enfermedades como la rabia, fiebres hemorrágicas, enfermedades parasitarias y salmonelosis.

CAPÍTULO 3

PROCESOS DE RECICLAJE

3.1 DESVULCANIZACIÓN

Recientemente existen varios procesos de desvulcanización como desvulcanización por ultrasonido, desvulcanización por microondas, desvulcanización por desulfuración, desvulcanización mecánica, desvulcanización térmica y recuperación por recurso renovable del material.

La recuperación de energía de las llantas usadas es posible desde un punto de vista energético global, es preferible reciclarlo a incinerarlo, debido a esto se han buscado procesos de desvulcanización física y químicamente para hacer del reuso del caucho posible.

3.1.1 DESVULCANIZACIÓN TÉRMICA

El caucho vulcanizado se puede desvulcanizar mediante calentamiento a una temperatura de 150 °C a 300 °C, bajo una presión de al menos 3.4×10^6 pascales, en presencia de 2-butanol, donde el peso molecular del caucho se mantiene a un nivel relativamente alto.

Esta técnica de desvulcanización no cambia significativamente la microestructura del caucho, y por tanto puede utilizarse en los mismos tipos de aplicaciones que el caucho original, es decir, el caucho desvulcanizado se puede recombinar y reutilizar en productos de caucho útiles, prácticamente de la misma forma que el caucho original. (Adhikari, 2000; Hunt, 2000)

3.1.2 DESVULCANIZACIÓN ULTRASÓNICA

Es un método ultrasónico continuo, utiliza un aparato para romper los enlaces carbono-azufre (C-S), azufre-azufre (S-S) y, si se desea, los enlaces carbono-carbono (C-C) en un elastómero vulcanizado.

Los elastómeros vulcanizados que tienen una red química tridimensional no pueden fluir bajo el efecto del calor y/o la presión, lo que crea un problema en el reciclado de llantas usadas.

Es un proceso discontinuo de extracción a base de disolvente, que en la presencia de presión y calor, logra la reducción de la red tridimensional del hule vulcanizado a una solución o suspensión.

Requiere al menos 5 minutos para conseguir la disolución del caucho ó que las partículas diminutas de hule queden suspendidas uniformemente en la mezcla líquida utilizando agua como vehículo de transmisión de ondas, posteriormente se aplica vibración ultrasónica que opera de 10 a 40 kHz con una intensidad mayor de 100 W/cm².

La goma ultrasónicamente tratada se vuelve blanda, haciendo posible de esta forma que este material sea procesado y conformado de forma similar a la que se emplea con caucho nuevo. (Adhikari, 2000; Isayev, 2004)

3.1.3 DESVULCANIZACIÓN MECÁNICA

La pulverización se lleva a cabo a altas temperaturas, por lo que se abate el peso molecular y el hule vulcanizado se rescata con agentes recuperadores pasándolo entre un estator liso y un rotor cilíndrico arreglado para proveer una zona de esquilado axial en el que es fraccionalmente impulsado por la acción de un rotor. La acción puede ser ayudada por el mezclado en cantidad apropiada de hule previamente recuperado, hule vulcanizado y/o por calor suplementario.

(Adhikari, 2000; Padella, 2004)

3.1.4 RECUPERACIÓN MECÁNICA

El proceso de recuperación mecánica de hule natural es preparado por un molino de bolas a 80°C, después se mezcla con varios aditivos de hule ó hule natural en distintas proporciones.

Estudios sobre las características de curado de los enlaces de hule fresco con hule recuperado indican que con el aumento en el contenido de hule recuperado el grado de curado incrementa, sin embargo el tiempo óptimo de curado y la reversión de la resistencia disminuye. La proporción del hule recuperado en los

enlaces incrementa los componentes, la pérdida de abrasión, la serie de compresión y la dureza mientras que la tensión, la elongación, la fuerza de rasgado y las resistencias de elasticidad y flexibilidad disminuyen.

La energía mecánica absorbida por el caucho, teóricamente, se utiliza para romper los enlaces azufre-azufre y producir un material que puede incluirse en el caucho virgen y curado. Los efectos mecano-químicos solo actúan en las partículas de la superficie, donde los efectos fisicoquímicos ocurren. Cuando los enlaces azufre-azufre se rompen, la cadena polimérica devulcanizada es debilitada en su enlace con las partículas superficiales y actúan como barrera para la partícula con enlace cruzado. (Amari, 1999; Adhikari, 2000; Vergnaud, 2000),

3.1.5 DESVULCANIZACIÓN POR MICROONDAS

La energía de microondas representa una fuente calorífica única y diferente a otros tipos de tratamientos térmicos con la que se minimiza la generación de desechos, se inmovilizan componentes tóxicos y se reciclan o reutilizan componentes de valor en los desechos.

Se obtiene un calentamiento rápido, se reduce el volumen, evita reacciones químicas, es fácil de controlar, es viable industrialmente, no existe exposición humana con tóxicos y utiliza poca energía.

Es una técnica utilizada para la desvulcanización de grupos polares que contienen elastómeros vulcanizados al azufre y que comprende la aplicación de una dosis controlada de energía por microondas entre 915 MHz y 2450 MHz y entre 41 y 177 V/h·lb en una cantidad suficiente para separar sustancialmente todos los enlaces carbono-azufre y azufre-azufre e insuficiente para separar cantidades considerables de enlaces carbono-carbono, por lo que no se despolimeriza.

El hule obtenido puede ser reutilizado con hule nuevo y se producen llantas de alta calidad utilizando el 25% de reciclado. (Adhikari, 2000; Wicks *et al*, 2005)

3.1.6 DESVULCANIZACIÓN POR DESULFURACIÓN

Es un proceso en el cual se ponen en contacto gránulos de goma vulcanizada con un solvente y un metal alcalino para formar una mezcla reactiva, se calienta esta mezcla en ausencia de oxígeno y a una temperatura suficiente para hacer que el metal alcalino reaccione con el azufre en la goma vulcanizada y mantener la temperatura por debajo de aquella en la que tiene lugar el agrietamiento de la goma, con el resultado de desvulcanizar la goma vulcanizada. (García *et al*, 2003)

3.2 INCINERACIÓN

La incineración de residuos comenzó en Estados Unidos y Europa Occidental en las décadas de los 50 y 60.

Desde 1970, en Francia, el proceso de reciclado de automóviles se lleva a cabo primero, removiendo las baterías y los fluidos (aceites, agua, anticongelante) y reciclándolos, después la chatarra se reduce mecánicamente y se dividen los restos en dos, el primero que es básicamente plástico de baja densidad separado por medio de un aireador y el segundo que son los metales ferrosos extraídos por medio de un campo electromagnético. (Powell, 1988; Lanoir *et al*, 1997)

Es un proceso exotérmico que consiste en la combustión de los materiales orgánicos de las llantas generando un producto gaseoso y un residuo sólido relativamente inerte y libre de microorganismos compuesto por escoria y cenizas.

Se lleva a cabo con el objeto de utilizar la energía térmica liberada de este proceso para otros procesos, es decir, la llanta es usada como combustible con objeto de reciclar energía, basándose en una combustión que se lleva a cabo a temperaturas muy elevadas, lo que obliga a verificar que los hornos estén constituidos por materiales resistentes, de alta calidad y de costo elevado. (SEMARNAT, 2002)

Algunas ventajas de la incineración son el poco espacio ocupado, mucho menor que en los rellenos sanitarios, la recuperación de metales y el manejo de diferentes cantidades de desechos.

La incineración se lleva a cabo generalmente en la industria cementera, que es el único sector certificado en la totalidad de sus plantas como industria limpia y se distingue desde hace décadas por disponer de la más alta tecnología en sus procesos al hacer que éstos sean respetuosos del medio ambiente.

Las empresas afiliadas a la CANACEM (CÁMARA NACIONAL DEL CEMENTO) invierten en tecnología para que las emisiones se ubiquen consistentemente por debajo de los límites establecidos por las normas nacionales e internacionales. (CANACEM, 2005)

El producto gaseoso que se genera al utilizar solamente carbón orgánico en los hornos cementeros está compuesto principalmente por sustancias que se encuentran en la atmósfera como se puede observar en la **Tabla 3.1**

Tabla 3.1 Composición de los gases en las emisiones del horno cementero

Compuesto	Porcentaje
Nitrógeno (N ₂)	45-66
Dióxido de Carbono (CO ₂)	11-29
Agua (H ₂ O)	10-39
Oxígeno (O ₂)	3-10
Otras emisiones polvo, cloruros, fluoruro, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos y metales	<1

Fuente: Cembureau 1997

La incineración de se realiza a diferentes velocidades de calentamiento, por lo que se deben de instalar un limpiador de emisiones y alimentar los hornos con pedazos de llantas de tamaño constante, por lo que se considera un proceso complejo y representa una gran inversión monetaria.

Al utilizar llantas como combustible alternativo se generan compuestos tóxicos como el monóxido de carbono (CO), óxido de zinc (ZnO), bióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV's), dioxinas, furanos, benceno, hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH's), cloruro de hidrógeno (HCl), arsénico (As), níquel (Ni) cadmio (Cd), bifenilos policlorados (PCB's), mercurio (Hg), zinc (Zn), vanadio (V), cromo (Cr), xileno, hollín, fenoles, dióxido de azufre (SO₂), óxidos de plomo (PbO) y tolueno.

3.2.1 INCINERACIÓN EN HORNOS ROTATORIOS

Debido a la alta temperatura de operación y al largo tiempo de residencia de los gases de combustión en la zona de quemado, los hornos de cemento tienen capacidad para utilizar de una forma segura una amplia variedad de combustibles derivados de petróleo, incluyendo llantas usadas, de modo que son un buen combustible auxiliar para los hornos que usan carbón o aceite, ya que su valor calorífico es mayor al de carbón (una llanta equivale a 20 libras de carbón), la concentración de nitrógeno, azufre y cenizas es menor y su contenido en acero proporciona hierro adicional al cemento.

Las altas temperaturas (1450 °C) permiten la combustión total de las llantas usadas y la oxidación total del acero sin que afecte negativamente la operación del horno ya que se convierte en óxido de hierro reduciendo así el costo en materias primas.

La forma en que las llantas pueden ser utilizadas como combustible depende de la configuración del horno, pudiendo tener un pretratamiento, como la molienda, para disminuir su tamaño o alimentarlas enteras, siendo este último el más utilizado debido a que el pretratamiento implica un costo extra.

Las llantas usadas proporcionan del 10% al 25% del valor calorífico total de combustible; el consumo anual varía entre los 2 y 3 millones de llantas usadas, reduciendo así la producción de óxidos de nitrógeno y no incrementando significativamente los componentes restantes de las emisiones atmosféricas.

En el caso de que el residuo contenga cloro o azufre, la combustión generará gases ácidos como el cloruro de hidrógeno y el óxido de azufre. Estos gases son neutralizados y absorbidos en su práctica totalidad por la materia prima, de naturaleza alcalina y las sales inorgánicas formadas se incorporan al clínker.

El azufre se incorpora a la cal de calcinación en forma de carbonato cálcico, que es una materia prima en la fabricación de cemento y toda la ceniza se añade al cemento, de tal forma que no hay residuos procedentes de las llantas de desecho.

En caso de que los residuos contengan metales, su presencia será controlada en las emisiones. Los numerosos estudios realizados sobre el comportamiento de los metales han demostrado que éstos son retenidos mayoritariamente en el clínker, con cifras de retención muy próximas al 100%, salvo para metales relativamente volátiles como el mercurio y el talio, que deberán ser controlados y limitados en los residuos que entren en el horno.

Por otra parte, los combustibles alternativos pueden aportar minerales que contribuyan a formar los compuestos del clínker. De acuerdo con la **Tabla 3.2**, las llantas usadas contienen un menor porcentaje de compuestos contaminantes que el carbón utilizado como combustible, además de la aportación de energía se utiliza el hierro para la composición del clínker, por lo que se da un reciclaje de materia prima contenida en el residuo.

Tabla 3.2 Comparación entre combustibles

Elemento	Llantas usadas (% peso)	Carbón (% peso)
Azufre (S)	1.23	1.59
Nitrógeno (N)	0.2	1.76
Cenizas	4.7	6.23

Fuente: Cembureau 1997

La presencia de cloro en el horno puede dar lugar a problemas de costras y obstrucción durante el proceso de fabricación. Además, el contenido en cloro en el cemento está limitado al 0,1 % en peso, por lo que debe garantizarse que el empleo de combustibles alternativos no introduzca cantidades significativas de cloro en el proceso.

3.2.2 INCINERADORES A NIVELES MULTIPLES (TABIQUERAS)

Para realizar tabiques rojos ó ladrillos se utilizan como materia prima arena roja de río, conocida como arcilla, agua y estiércol de vaca, que da más resistencia al tabique, los artesanos baten la tierra hasta lograr una mezcla chiclosa.

Una vez llenos los moldes, se dejan reposar durante 24 horas aproximadamente hasta que se seca la arcilla. Al sacarlos de allí se obtienen ladrillos grises, blandos y sensibles como el lodo. Se colocan uno sobre otra hasta formar largas filas de enrejados y al paso de una semana estarán totalmente secos y listos para ser colocados en una especie de sótano subterráneo al que se le prende fuego con aserrín, madera, llantas usadas o petróleo; se mantiene encendido el horno durante 48 horas y cuando la llama cambia de color rojizo hasta un azul tenue que termina por extinguirse, se sabe que el tabique esta cocido. Pero aún deben pasar 24 horas para que tanto el horno como los tabiques se enfríen totalmente; después de casi 10 días, se obtiene el ladrillo rojo, fuerte y consistente.

Las tabiqueras están establecidas en San Martín Chalco, Naucalpan, San Vicente Chicoloapan, Cuautitlán e Ixtapaluca en el Estado de México; en Acolman, Temammamac y Jazo en Hidalgo y en San Martín Tezmelucan, Puebla.

Debido al tiempo de preparación de la mezcla de los ladrillos, en general cada horno es encendido una vez al mes, y se calcula que entre todas las tabiqueras utilizan 24,000 llantas.

El problema es que las tabiqueras no cuentan con un control de emisiones a la atmósfera, la cantidad de contaminantes emitidos por los 581 hornos tabiqueros en 11 municipios, concentradas la mayor parte en la Zona Metropolitana del Valle de México, emiten 1020 toneladas/año.

Las emisiones generadas por la fabricación de tabique rojo, representa el 1.4% del total de las emisiones contaminantes a la atmósfera producidas por fuentes aéreas (71059 ton/año). (SEMARNAT, 2002)

3.2.3 CONTROL DE EMISIONES Y CONSECUENCIAS

Como respuesta a estos problemas, la tecnología de la incineración se ha desarrollado los últimos años con el fin de reducir las emisiones de gases y humos. Las incineradoras operan a temperaturas elevadas con el fin de destruir dioxinas y furanos, normalmente lo hacen a 1450 °C. Por otro lado y para garantizar la composición de los gases emitidos incorporan unidades de lavado y filtros.

Existen varias tecnologías de proceso como incineración de parrilla, lecho fluidizado y plasma. El objetivo de todas ellas es el de conseguir la combustión total y emitir a la atmósfera tan sólo CO₂ y agua, después de haber retenido los metales pesados, gases ácidos y partículas generadas durante el proceso de combustión. De todas ellas la tecnología del lecho fluidizado permite emisiones por debajo de los límites establecidos. Se emplea un buen contacto en una cámara de postcombustión del comburente con un lecho de arena calentado a 850°C en presencia de un porcentaje superior al 6% de oxígeno en un periodo de al menos dos segundos.

3.3 PIRÓLISIS

El proceso de pirólisis se define como la descomposición térmica de macromoléculas en ausencia de oxígeno o de cualquier otro reactante, para la obtención de productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual) que se utilizan como combustibles y su proporción puede modificarse en función de los residuos de partida. (SEMARNAT, 2002)

La posibilidad de producir un combustible sólido, que puede ser utilizado fuera de la propia planta, es la particularidad más interesante de esta tecnología y le confiere un cierto parecido a los combustibles sólidos recuperados por lo que obtiene la posibilidad de concurrir en el mercado de combustibles alternos.

El rendimiento económico de esta actividad está relacionado con la reducción del uso de vertederos para residuos y la producción de energía eléctrica, térmica o de combustibles alternos a partir del gas o de los aceites pirolíticos.

Las industrias que producen combustible sólido (carbón pirolítico) necesitan de la colaboración entre las propias instalaciones generadoras del combustible y los potenciales usuarios del carbón pirolítico, generalmente plantas de cemento. Esta simbiosis puede reducir de forma considerable los costos para el tratamiento global y al mismo tiempo, supone una recuperación energética casi completa.

Hay muchas variantes de la pirólisis, como pirólisis de lecho fijo, de lecho fluido, de lecho dirigido y de lecho agitado.

La pirólisis de lecho fluidizado ha recibido especial atención porque puede convertir una gran variedad de materiales, incluyendo plástico, aceites, aguas cloacales, en petroquímicos crudos. Estos sistemas utilizan un gas de polímero o un gas inerte para fluidizar un lecho de arena, a temperaturas entre los 400 y 800 °C, para producir productos de petróleo líquidos.

El lecho fluidizado de arena provee un buen mezclado y transferencia de calor. Utilizando un horno, el aceite y las cenizas libres se convierten en carbón negro de

alta calidad que se denomina negro de humo y es esencial para la producción de las llantas nuevas.

Según los datos de la empresa Chemysis S.A., este procedimiento (fabrica piloto) está operativo en Taiwán desde 2002 con cuatro líneas de pirolisis que permiten reciclar 9000 toneladas de llantas usadas al año. En la actualidad el procedimiento ha sido mejorado y es capaz de tratar 28.000 toneladas de llantas usados al año, a través de una sola línea.

Los productos obtenidos después del proceso de pirolisis son principalmente: gas pirolítico (similar al propano) que se puede emplear para uso industrial; aceite industrial líquido que se puede refinar en diesel; coque y acero.

Las inversiones y los gastos de explotación necesarios para tratar las llantas de este modo son elevados, además de que tiene emisiones a la atmósfera altamente contaminantes y presenta el problema de la separación de compuestos carbonados.

3.3.1 PIRÓLISIS A BAJA TEMPERATURA

Este tipo de pirolisis utiliza cera de polietileno a una temperatura de 400°C como medio de reacción para descomponer las llantas usadas en aceites de bajo punto de fusión que contienen una gran cantidad relativa de oleofinas (aproximadamente el 95% de la cantidad inicial), cera y hollín, donde las oleofinas son las de interés debido a la utilidad como materia prima en síntesis orgánicas.

Comienza en torno a los 250°C llegando a completarse a los 500°C.

3.3.2 PIRÓLISIS A ALTA TEMPERATURA

Las llantas usadas son introducidas a un reactor de lecho turbulento auxiliar de arena de cuarzo a una temperatura entre 630°C y 877°C. Como gas de fluidización se utiliza gas de pirolisis recalentado a 427°C en un cambiador de calor. El aporte de calor se consigue mediante tubos de calefacción radiales calentados por propano o gas de pirolisis. (Ver Figura 3.1)

El proceso consiste en triturar la llanta usada en trozos de 10-25 mm que se almacenan en dos silos de 100 L cada uno, la carga se hace mediante tornillos sin fin, refrigerados por agua, directamente en el lecho fluidizado con arena de cuarzo. El gas producido sale por la abertura superior y son se pasan a través de condensadores y refrigerantes, recogiendo diferentes condensados en depósitos adecuados por un lado y los no condensables del gas de pirolisis por otro. Este gas una vez comprimido se pasa a depósitos, desde donde se enviara al reactor, como gas de fluidificación y posteriormente a los quemadores.

Sus ventajas son que no involucra un paso de separación, recupera los plásticos en sus materias primas, por lo que se pueden rehacer polímeros puros con mejores propiedades y menos contaminación.

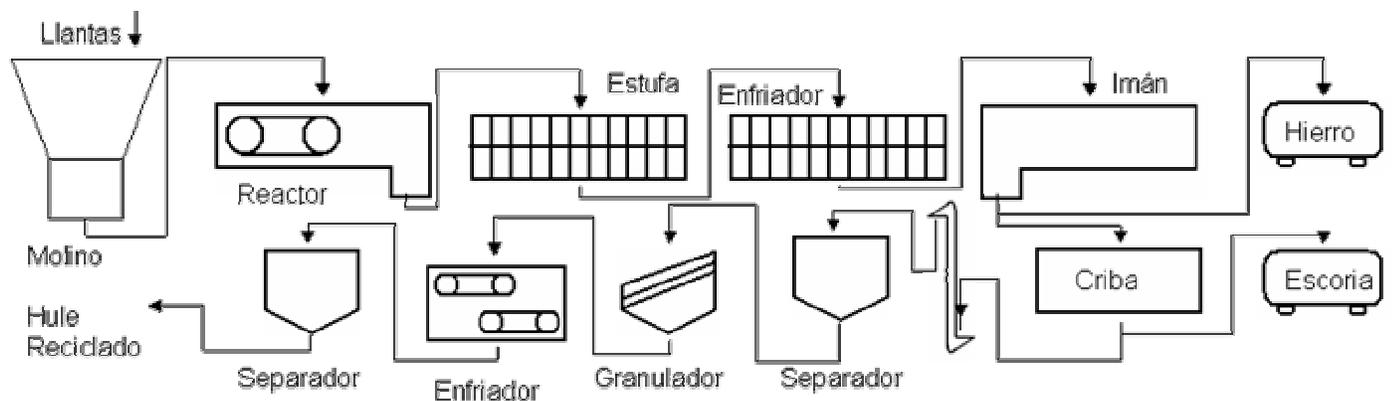


Figura 3.1 Proceso pirolítico

Las materias sólidas compuestas de hollín y los metales de las llantas usadas se separan después del sistema de secado/desgasificado, se refrigeran junto con lo

restos aromáticos de los aceites adheridos a las materias sólidas mezcladas (desgasificar/desaceitar) y ligadas.

En los siguientes pasos del proceso, se separan las sustancias sólidas tales como los alambres tras un colector magnético, los restos de materiales sintéticos son eliminados aglomerándolos en el cribador ó separador, para mantener las características del hollín y utilizarlo en la industria del hule es necesario conocer el tamaño de las partículas de la mezcla original del hollín.

Para llevar a cabo la molienda se utiliza un molino de chorro y se transforman los granos gruesos del carbono del hollín en un polvo fino.

En la etapa de peletización, al polvo de hollín se le agrega agua y materiales de ayuda, definiendo así su solidez y el tamaño de aglomerado. Las perlas entonces húmedas son secadas en una centrifugadora y caen en la planta de confección y empaquetadas en los silos o sacos.

El gas producido en la etapa de la pirólisis es internamente utilizado como energía térmica para el proceso de secado. La utilización del aceite producido se determina en forma local.

3.4 GASIFICACIÓN

La gasificación de un sólido es un proceso termoquímico que engloba la descomposición térmica de la materia orgánica y la acción de un gas que reacciona principalmente con el residuo carbonoso procedente de esa descomposición térmica. (Ver **Figura 3.2**)

El objetivo de las plantas de gasificación es la obtención de un combustible gaseoso de alta calidad que pueda utilizarse en ciclos térmicos combinados o como materia prima para la obtención de otros productos. Desde el punto de vista energético, la obtención de gas de síntesis o gas limpio muestra grandes atractivos. La causa en la que reside este interés es que la gasificación permite la utilización de los ciclos combinados, que frente a los ciclos convencionales de vapor, resultan más eficientes.

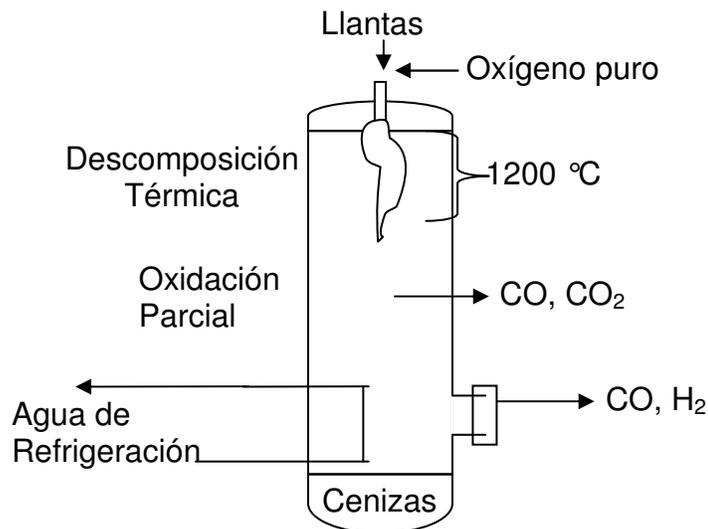


Figura 3.2 Gasificador de Llantas

La gasificación de residuos urbanos tiene poco tiempo y según las numerosas experiencias en este ámbito, no existen problemas para obtener gas crudo (el gas crudo es un tipo de gas que va acompañado de impurezas tales como partículas sólidas, compuestos orgánicos ligeros, agua). Este tipo de gas sucio debe ser sometido a su depuración (gas de síntesis) para su utilización en ciclos

combinados de gas. Desde el punto de vista técnico la limpieza del gas crudo no genera problemas, pero puede ser poco atractivo desde el punto de vista económico.

El término genérico gasificación engloba una gran variedad de procesos en los que pueden obtenerse muy diversos productos. Basándose en el agente gasificante empleado puede establecerse una primera clasificación de los procesos de gasificación:

- a) Con aire: La reacción de combustión parcial con el aire da lugar a una reacción exotérmica que da lugar a un gas de bajo poder calorífico, que será aprovechado con fines de carácter energético.
- b) Con oxígeno: Se produce un gas de poder calorífico medio, pero de mayor calidad al no estar diluido con N_2 . Además de aplicaciones de carácter energético puede utilizarse como gas de síntesis para la obtención de metanol.
- c) Con vapor de agua y/o oxígeno (aire): Se produce un gas enriquecido en H_2 y CO que se puede utilizar como gas de síntesis para diversos compuestos (amoníaco, metanol, gasolinas, etc).
- d) Con hidrógeno: Se produce un gas de alto contenido energético que, por tener altos porcentajes de metano, puede utilizarse como sustituto del gas natural.

Otra clasificación interesante de los procesos de gasificación utiliza como criterio el movimiento relativo de los agentes gasificante y sólido gasificado en el interior del gasificador.

En base a este criterio los principales tipos de gasificadores son: de lecho móvil ó lecho fijo en corrientes paralelas, mejor conocido como downdraft por su traducción al inglés, o en contracorriente ó updraft por su nombre en inglés, y de lecho fluidizado.

Como los procesos de gasificación comportan reacciones químicas, generalmente, de carácter exotérmico, la temperatura suele elevarse. (Ver **Figura 3.3**)

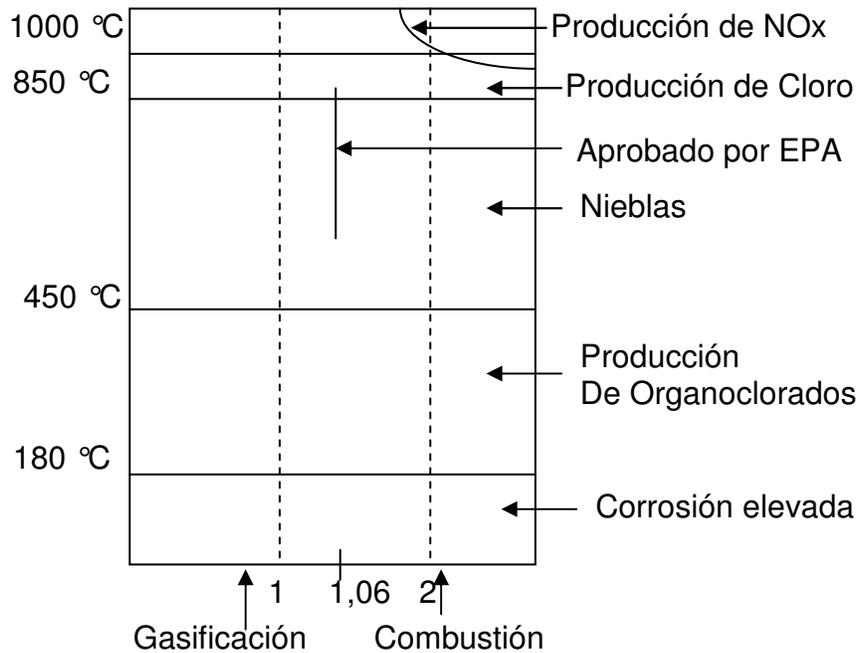


Figura 3.3 Comparación de niveles entre combustión y gasificación

3.4.1 TERMOQUÍMICA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN

En el proceso de gasificación tienen lugar una gran variedad de reacciones cuyo orden e importancia relativa dependen de las condiciones de operación y del agente gasificante utilizado.

Se llevan a cabo tres etapas o boques en el proceso como son:

1. Pirólisis o descomposición térmica.- Mediante calor, el sólido original se descompone en una mezcla sólido, líquido y gas. Al sólido originado en esta etapa se le suele denominar char y a los líquidos, debido a la presencia mayoritaria de alquitranes y vapores condensables, tar.
2. Oxidación o combustión.- Tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante como oxígeno o aire e implica el conjunto de reacciones de

oxidación, tanto homogéneas como heterogéneas, fundamentalmente exotérmicas, mediante las que se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga.

3. Reducción o gasificación.- La constituyen las reacciones sólido-gas o en fase gas, mediante las que el sólido remanente se convierte en gas. Se trata de reacciones fundamentalmente endotérmicas, algunas de las cuales tienen lugar en muy poca extensión, o solo tienen lugar en determinadas condiciones, como ocurre con algunas reacciones de hidrogenación y/o reformado.

Las etapas de oxidación y reducción pueden considerarse conjuntamente en una sola etapa de gasificación en la que tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el char y la mezcla gaseosa presente.

Existen una serie de factores que influyen en el proceso de gasificación, pudiendo distinguirse entre los que se refieren al modo de operación y al sólido gasificado, y los que son inherentes al diseño del gasificador y de los equipos auxiliares

3.4.2 FACTORES DE OPERACIÓN

Dentro de los factores de operación que se deben tener en cuenta están la temperatura, presión y la relación entre el gasificante y el residuo.

a) Temperatura

La temperatura es un parámetro importante en todas las etapas, y por tanto en el rendimiento final del proceso. En concreto, las proporciones entre char, tar y gas en los productos de pirólisis dependen estrechamente de la velocidad de calentamiento y de la temperatura final alcanzada. Como idea general puede decirse que a altas velocidades de calentamiento y alta temperatura final se produce mayoritariamente gas, mientras que a temperaturas finales y velocidades de calentamiento menores se producen mayoritariamente líquidos o sólidos.

En los gasificadores de lecho fluidizado se tiene normalmente velocidades de calentamiento altas (hasta miles de grados centígrados por segundo), mientras que en los reactores de lecho móvil, las velocidades de calentamiento suelen ser moderadas, del orden de 0,2 - 0,5 °C/s.

En la etapa de gasificación propiamente dicha, dada la reversibilidad de la mayoría de las reacciones, la temperatura influye en los equilibrios de reacción. En general, para distintos combustibles, puede decirse que el aumento de temperatura favorece el incremento del contenido en el gas de H₂ y CO y la pérdida de metano (CH₄) y de agua.

b) Presión

El aumento de la presión desfavorece las reacciones de gasificación, aumentando las proporciones de hidrocarburos y alquitranes. Los gasificadores de lecho móvil suelen trabajar a presión atmosférica y los de lecho fluidizado suelen trabajar a presión, alcanzándose hasta los 30 bares en algunos casos.

c) Relación agente gasificante/residuo

Es uno de los parámetros más importantes en la gasificación, especialmente cuando está se autoabastece energéticamente mediante la oxidación parcial, con aire u oxígeno del residuo tratado.

Valores excesivamente bajos de este parámetro pueden no generar la cantidad suficiente de energía para mantener el proceso en las condiciones adecuadas, produciéndose una disminución del rendimiento. Por otro lado, cuando el agente gasificante es aire, existe además un efecto de dilución por parte del N₂. Por ello hay un valor óptimo de la relación gasificante/residuo para cada proceso, que depende básicamente de la composición del residuo gasificado.

Así se conjuga, por un lado el aumento de temperatura que produce una disminución de la proporción de residuo sólido y condensables generados en la etapa de pirólisis, y por otro la disminución de la calidad del gas.

3.4.3 FACTORES DEPENDIENTES DEL RESIDUO GASIFICADO

Al iniciar el proceso de gasificación se deben realizar diferentes análisis para obtener una alta eficiencia en el proceso, a continuación se mencionan algunos pasos.

a) Análisis elemental

El contenido de C, H, N, S, Cl y O influye en la proporción agente gasificante-residuo óptima, además de delimitar la producción de contaminantes del tipo de NO_x y/o S, o de HCl.

b) Análisis inmediato

Se analiza el contenido en cenizas, materia volátil y carbono fijo.

El contenido en cenizas nos dice la cantidad de sólidos que será necesario retirar del gasificador por unidad de masa procesada. Aunque se han gasificado residuos con hasta un 24% de cenizas, no es deseable sobrepasar un contenido del 10 %. Estas cenizas se han de retirar del gasificador para evitar su acumulación. En los gasificadores de lecho móvil esto se hace extrayéndolas por la parte inferior, y en los de lecho fluidizado, la velocidad del gas ha de garantizar el arrastre de las cenizas.

Una propiedad importante de las cenizas es su punto de fusión. Si este se sobrepasa se pueden formar costras que obstruyen los equipos. Así mismo, las cenizas, al ser inertes, no intervienen en los equilibrios químicos de las reacciones de gasificación, pero pueden tener un efecto catalítico acelerando la reacción de gasificación del residuo carbonoso con vapor de agua, especialmente al existir óxidos metálicos como óxido de dipotasio (K₂O), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), pentóxido de fósforo (P₂O₅), etc.

c) Poder Calorífico

Puede indicarse el superior o el inferior. Es el parámetro que determina la máxima energía aprovechable de un residuo desde el punto de vista de su uso como combustible.

d) Tamaño y características de partícula

Hay que tener presente que en el proceso va a tener lugar un calentamiento de las partículas, la difusión de reactivos hacia la partícula y de productos desde esta hacia el medio gaseoso que la rodea, y reacciones sólido-gas en la superficie sólida. Por esto, el tamaño de partícula influye en el tiempo necesario para que el proceso tenga lugar y en el volumen de reactor adecuado para ello.

En el caso de los lechos fluidos este parámetro incide además sobre la velocidad mínima de fluidización. Para variar el tamaño de partícula se pueden considerar la densificación y la molienda, pero estas posibilidades incurren en costo adicional.

Por otro lado residuos poco densos pueden crear problemas de formación de canalizaciones preferenciales o dificultar la fluidización. En los lechos fijos pueden crearse problemas de pérdida de carga y el colapso del movimiento del lecho, dependiendo de la forma de las partículas.

e) Humedad

Influye sobre el balance térmico del proceso pues una parte del calor producido debe utilizarse para evaporar esa cantidad de agua. También influye sobre la composición del gas de salida, incluso desplazando algunas reacciones.

En general se aceptan humedades de entre 10 y 20 % para lechos móviles y hasta el 40 % para lechos fluidos.

3.4.4 PRINCIPALES TIPOS DE GASIFICADORES

Existen muy variadas configuraciones de reactores para llevar a cabo procesos de gasificación, dado que aunque existen unos modelos básicos, la imaginación de los diseñadores ha llevado a nuevos modelos, y a asociaciones, buscando siempre la mejora de la calidad del gas y una mejor adaptación al objetivo perseguido.

3.4.4.1 GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO

No se pueden distinguir zonas más o menos diferenciadas en las que se lleven a cabo los distintos procesos de secado, pirólisis, etc. Dentro del gasificador, cada partícula es sometida de forma instantánea, consecutiva y simultáneamente a estos procesos en cualquier punto tras su entrada, siendo finalmente las cenizas arrastradas por el gas emergente.

La elevada velocidad de reacción y la excelente mezcla hacen que los perfiles de temperatura y conversión sean uniformes a lo largo del reactor, permitiendo un control muy preciso de las condiciones de operación siendo esta la causa de la alta capacidad específica (kg de sólido/ m³ de reactor) frente a otros tipos de reactores. La operación con estas unidades a presión, también ayuda a disminuir el tamaño del reactor.

Dentro de los gasificadores de lecho fluidizado se distinguen varios subtipos, entre los que el lecho fluidificado circulante destaca. En estos lechos fluidos circulantes, el lecho se encuentra en condiciones de fluidización rápida y los sólidos son arrastrados, debiendo ser recogidos y recirculados, en estas condiciones el contacto sólido-gas es mejor que en otros regímenes de fluidización y la uniformidad en temperatura y conversión son mayores que en el lecho fluido convencional, se reduce así mismo la tendencia de las partículas a aglomerarse pudiendo adicionarse reactantes gaseosos a diferentes niveles, sin embargo la complejidad de los equipos aumenta, produciéndose mayor desgaste debido a las mayores velocidades de los sólidos. (García, 2003)

3.4.4.2 GASIFICADOR DE LECHO MÓVIL EN CONTRACORRIENTE

En el gasificador de lecho móvil en contracorriente o Updraft (por su nombre en inglés), el sólido y el gas se mueven en sentidos contrarios, normalmente el sólido descendente y el gas ascendente.

La partícula se encuentra primero con gases calientes procedentes de las zonas inferiores, lo que aumenta su temperatura a medida que desciende en el lecho a costa del calor sensible de los gases ascendentes.

Inicialmente la partícula se seca y a determinada temperatura comienzan los procesos de pirólisis, generándose los gases que ascienden a la salida del reactor, como productos de pirólisis también aparecen mezclados con el gas, alquitranes y vapores condensables que salen del gasificador sin craquear o quemar.

Continuando en sentido descendente, la partícula, que ya es char, se encuentra con los gases de combustión y el oxígeno necesario para mantener térmicamente el proceso teniendo lugar las reacciones de oxidación y reducción entre el sólido y la mezcla gaseosa presente, con lo que el gas producido en esta zona se mezclará con el producido en la superior de pirólisis componiendo el gas producto que sale del gasificador.

El perfil de temperatura es tal, que va aumentando a medida que se baja en el reactor, alcanzándose un máximo antes de llegar al extremo caliente. La conversión también aumenta a medida que se desciende en el reactor, alcanzando prácticamente el 100 % del sólido en el extremo caliente.

Este gasificador es de fácil construcción y operación, su eficacia térmica es alta, la baja temperatura de la salida del gas, la alta conversión y bajo arrastre de sólidos son algunas de las ventajas que se obtienen con este tipo de gasificador.

El principal inconveniente es que el gas producido contiene alquitranes y condensables producidos en el proceso de pirólisis inicial de las partículas, por lo que el proceso de limpieza del gas puede volverse tecnológicamente complejo y económicamente costoso y existe el riesgo de fusión de cenizas.

3.4.4.3 GASIFICADOR DE LECHO MÓVIL EN CORRIENTES PARALELAS

En el gasificador de lecho móvil en corrientes paralelas ó downdraft (por su nombre en inglés), el sólido y el gas se mueven en el mismo sentido, normalmente descendente.

Una partícula que entra al gasificador por la parte superior, sufre sucesivamente los procesos de secado y pirólisis al someterse a un progresivo aumento de temperatura en su camino descendente. Este perfil de temperatura se debe fundamentalmente a la conducción o radiación de calor a temperaturas lo bastante altas, desde la parte inferior, generadas mediante la combustión parcial de los productos que allí llegan.

Los gases, el tar y el char, descienden hasta la zona de oxidación donde, con el oxígeno introducido, se proporciona la energía necesaria para mantener térmicamente el proceso. Esto quiere decir que es así como se provoca el perfil de temperaturas de la parte superior del reactor, aumentando el calor sensible y la temperatura de los productos que continúan su camino descendente.

Al haber sufrido estos cambios en calor sensible y temperatura, aún cuando cesa el aporte de oxígeno y se obtiene una zona de reducción, los productos continúan reaccionando entre sí, lo que da como resultado, una disminución de la temperatura y un incremento de la cantidad y calidad del gas producido.

Dado el perfil de temperatura y la historia térmica de los productos, al haber atravesado previamente una zona de alta temperatura, los tar o alquitranes, están en muy pequeña proporción en el gas producto. Para evitar que existan zonas frías o perfiles radiales de temperatura, y que de esta forma se puedan escapar los tar, es necesario un buen sistema de distribución del oxidante, además de reducir la sección del gasificador en la zona de oxidación. Este gasificador es de fácil construcción y operación y su principal ventaja es el bajo contenido de tar en los gases.

La principal ventaja de este tipo de gasificador es la de producir un gas relativamente limpio de alquitranes, aunque a una temperatura más alta que el updraft.

3.4.4.4 PLASMA (GASIFICACIÓN A ALTA TEMPERATURA)

El plasma consiste en un proceso de gasificación que emplea temperaturas muy altas. Esta fórmula permite la obtención de una mayor cantidad y calidad de un gas de síntesis que puede obtenerse a partir de residuos orgánicos. Otra característica de esta tecnología es la posibilidad de obtener residuos secundarios valorizables, se tratan residuos generados como desecho de plantas de tratamiento de residuos primarios y se les extrae algún tipo de rendimiento.

Si se compara la gasificación convencional con el plasma, tratando el mismo tipo de residuos, puede afirmarse que el plasma aumenta la cantidad y calidad del gas producido.

Hoy, ninguno de los procesos analizados tiene experiencia en la utilización del gas limpio (gas de síntesis) en ciclos combinados. Por ello, los altos rendimientos energéticos previstos no se encuentran avalados por la experiencia. Sin embargo, y dadas las altas temperaturas de transformación empleadas, parecen señalar que la calidad de gas producido permitirá obtener un gas de síntesis de calidad adecuada para los ciclos combinados en proyectos tecnológicos.

Para obtener unos resultados convenientes se obliga a tratar residuos de un elevado poder calorífico, con una humedad baja, y escaso contenido de residuos inertes (los que ni son peligrosos, ni tienen potencialidad de contaminar), lo que muestra el camino para la utilización de combustibles sólidos recuperados de alta calidad.

3.4.4.5 GASIFICADOR DE HORNO ROTATIVO

El funcionamiento de este tipo de reactor presenta similitudes con los gasificadores de lecho móvil pero con propias características, sobre todo por lo que concierne a la parte mecánica que facilita el desplazamiento de los sólidos, lo que hace más fácil el funcionamiento en continuo del sistema. (Ver **Figura 3.4**)

En un horno rotativo el gas puede circular en contracorriente o en corriente directa con el sólido, teniendo cada caso sus ventajas e inconvenientes.

El proceso que siguen los sólidos dentro de un horno en contracorriente, se divide en cuatro etapas:

1. Alimentación de los sólidos.

Los sólidos se descargan en la tolva de entrada, cayendo a través de un conducto vertical hasta el alimentador que mediante un pistón hidráulico, introduce los sólidos en el horno, a través de la cámara de carga entran en el horno rotativo donde se encuentran con el flujo de gases calientes que salen del horno.

2. Calentamiento inicial de los sólidos.

En el primer paso dentro del horno se produce un intercambio térmico entre los residuos y los gases, calentándose y secándose los primeros, y enfriándose los segundos. La temperatura en esta primera sección no supera los 400 °C. El girar los residuos facilita la mezcla con el flujo saliente de gases mejorando el intercambio térmico y la retención de partículas en suspensión en los gases.

3. Carbonización y formación de gas combustible.

Los residuos están calientes y a medida que avanzan por el horno, los gases que se encuentran, están más calientes, por lo que comienzan a descomponerse por el calor formándose una mezcla de gases combustibles y una fracción sólida similar al carbón vegetal. La mezcla de gases carece de oxígeno por lo que no puede arder y la fase sólida restante se encuentra a una temperatura muy alta.

4. Combustión de la fracción sólida.

En el sector final del horno, el carbón caliente se encuentra con un flujo de aire, con lo que se inflama y arde; esta combustión permite mantener la temperatura necesaria para que continúe el proceso, la totalidad del oxígeno del aire que entra por el extremo caliente del horno es consumido, lo que permite que el gas, que sale por el otro extremo del horno, tenga una composición carente de oxígeno y rica en gases combustibles además de que el volumen de gas combustible producido es mínimo facilitando su tratamiento para realizar una combustión más limpia.

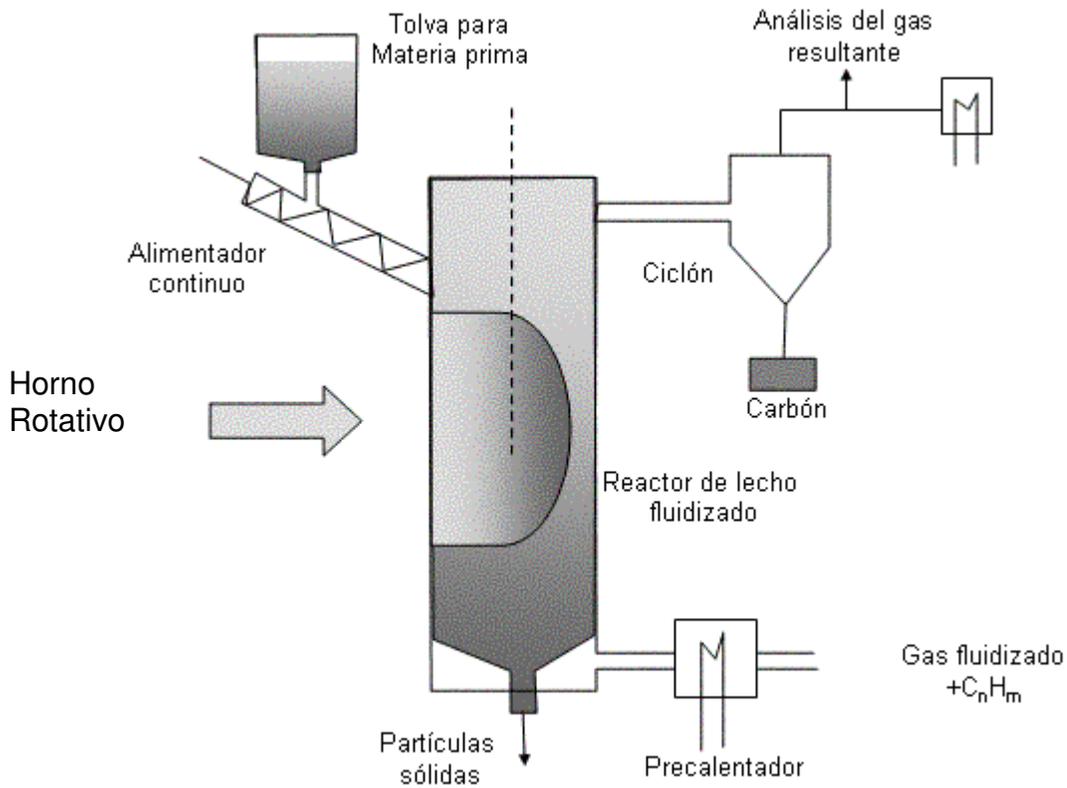


Figura 3.4 Gasificador de Horno Rotativo

3.4.5 ELECCIÓN DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE LA FRACCIÓN NO RECICLABLE

Cuando se lleva a cabo una combustión de un material con componentes acídicos (cloruros y sulfatos), que puede formar compuestos organoclorados y que puede ser considerado como un material renovable que ha de ser utilizado dentro de una normativa exigente con la mayor eficiencia posible, se debe elegir un sistema que permita realizar la combustión completa para evitar generar compuestos que a su vez representarían un problema ambiental.

Como es sabido la relación de equivalencia (RE) se define por la cantidad de oxígeno a incorporar para alcanzar la proporción estequiométrica que definiría la combustión completa, en consecuencia los valores de RE menores que 1, definen condiciones de gasificación, valores superiores a 1 definen condiciones de combustión con el exceso de oxígeno correspondiente y valores mayores de 1,06 representan un proceso pirolítico.

Desde el punto de vista de los gases que se generan a cada temperatura y condición bien conocidos en condiciones de pirólisis por análisis térmico diferencial y más difícilmente establecidos en condiciones de combustión incompleta por problemas de tipo cinético que no permiten una identificación absoluta entre el problema y la muestra analizada, se puede establecer que a partir de 130 °C se inicia la pirólisis de materiales de carácter exotérmico, que elevan la temperatura del material mezclado con la aparición de nuevos fenómenos pirolíticos de otros componentes como pueden ser los plásticos, textiles, gomas, etc. Son de especial importancia en esta etapa los comportamientos de compuestos de azufre, que tienden a dar ácido sulfhídrico (H_2S) en condiciones reductoras y dióxido de azufre (SO_2) en condiciones oxidantes y los de cloro que tienen la particularidad de formar compuestos intermedios volátiles en la secuencia de craqueo durante la pirólisis que tiene

como productos finales cloruro de hidrógeno (HCl) y cloro gas (Cl_2), en función de las condiciones de oxidación medidas por la RE.

Un sistema constituido por un lecho estático de sólidos y un gas circulante (aire primario) tendrá una emisión de compuestos organoclorados de peso molecular bajo (volátiles) y de HCl que accederán a zonas de oxidación (aire secundario) en donde se puede progresar en la descomposición de organoclorados para formar más HCl o, en condiciones definidas, Cl_2 .

La consecuencia clara, es que en los gases de salida del horno habrá organoclorados si la eliminación no es completa, HCl o Cl_2 que han de ser retirados de dicha corriente o bien limitan la eficiencia de producción de energía, posponiendo su necesaria eliminación para las etapas finales.

La consideración de este reducido número de conceptos permite establecer que ninguna de las tecnologías actualmente en funcionamiento permite la utilización de un gasificador con rendimientos en producción de energía eléctrica elevados y con garantías medioambientales suficientes. La incorporación de aditivos que retengan en grado apreciable cloruros y sulfuros es perfectamente viable y retiene altos porcentajes de azufre y cloro en las escorias a temperaturas no muy superiores a 600 °C lo que invalida la acción como solución definitiva para el uso eficiente.

3.5 TRITURACIÓN

La trituración es uno de los procesos más socorrido por la limpieza, es puramente mecánico y por tanto los productos resultantes son de alta calidad y limpios de todo tipo de impurezas, lo que facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones.

3.5.1 TRITURACIÓN MECÁNICA

La trituración con sistemas mecánicos es, casi siempre, el paso previo en los diferentes métodos de recuperación de llantas, por que favorece la ausencia de compuestos contaminantes en el medio ambiente.

El proceso consiste en romper la llanta mecánicamente, en partículas pequeñas, el acero es retirado por medio de un separador magnético (cribas vibratorias y separadores convencionales como la centrifuga, etc.), los componentes de fibra o textil son separados por clasificadores neumáticos u otro equipo de separación con alto desempeño y se puede producir caucho de costo relativamente bajo, el mantenimiento, la obtención de partes del equipo y piezas de repuesto son fáciles de conseguir y se requiere poca mano de obra para operar y repara el sistema.(SEMARNAT, 2002)

Inicialmente se clasifican los desperdicios, después se desmenuza en molinos de trituración como el molino mezclador de dos rodillos abierto, en la pulverización se abate el peso molecular drásticamente, debido a un esquileo mecánico a alta temperatura. El hule vulcanizado en forma particular (llantas usadas) se extrae con agentes recuperadores pasando el hule entre un estator esencialmente liso y un rotor cilíndrico arreglado para proveer una zona de esquileo axial en el cual es fraccionalmente impulsado por la acción de un rotor. La acción puede ser ayudada por el mezclado en cantidad apropiada de hule previamente recuperado o vulcanizado y/o por calor suplementario. (Adhikari, 2000)

Una de las alternativas para variar la capacidad de la trituradora y como consecuencia el tamaño de producto resultante consiste en el cambio de la configuración de la cuchilla, generalmente el material triturado tiene un ancho aproximadamente al de la cuchilla, sin embargo, la longitud del producto no puede ser definida de la misma forma, siendo normalmente inferior al de la longitud de la cuerda ente los dientes consecutivos en la misma cuchilla y cuanto mayor sea el número de dientes, los productos obtenidos serán de menor dimensión, no obstante, es necesario tener en cuenta la potencia del corte que limita el número final de elementos. (Ver **Figura 3.5**)

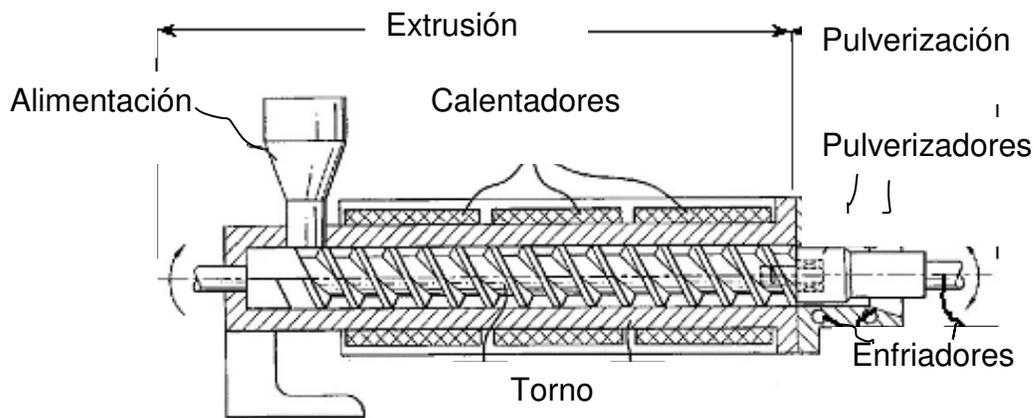


Figura 3.5 Equipo de Trituración Mecánica

Existen diferentes mercados para las llantas molidas o pulverizadas, en Estados Unidos se utilizaron cerca de 12.5 millones de llantas en 1996 en productos asfálticos, el caucho de llanta pulverizada le proporciona al pavimento características de flexibilidad y elasticidad que aumentan su vida útil por lo menos en un 50% a un costo efectivo menor que el del pavimento convencional, disminuye el ruido, el desgaste del rodaje de vehículos, y reduce la emisión del material particulado que se desprende de los pavimentos.

España, Canadá y Estado Unidos son líderes en la utilización de la llanta molida como materia prima para producción de pavimento asfáltico.

3.5.2 TRITURACIÓN CRIOGÉNICA

A mediados de los años 60s se desarrollo esta técnica que utiliza bajas temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea convirtiéndolo en un material frágil y quebradizo. (Adhikari, 2000)

Este tipo de trituración, utiliza las llantas usadas enteras, donde se congelan con nitrógeno líquido y se golpean para poder liberar la estructura mecánica o textil del caucho, recogiénose este ultimo en forma de polvo y el nitrógeno en forma de gas.(SEMARNAT, 2002)

Este proceso tiene cuatro etapas básicamente, la extrusión, donde se necesitan pedazos grandes de llantas, después se calandra (proceso que consiste en la “satinación” del hule), se premoldea para remover el aire atrapado para evitar burbujas y por último se moldea en la forma que se requiera. (Ver **Figura 3.6**)

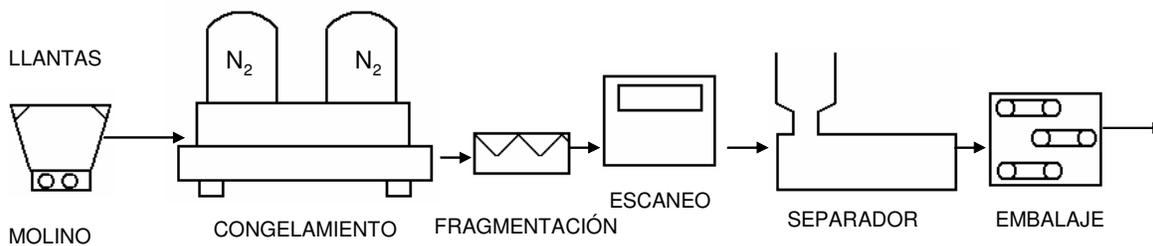


Figura 3.6 Trituración Criogénica

Existen algunas desventajas, como la baja calidad de los productos que se obtienen de la mezcla de los materiales que conforman la llanta antes de ser procesada, necesita unas instalaciones muy complejas, que lo hacen poco rentable económicamente, el mantenimiento de la maquinaria y del proceso es difícil, se obtienen productos de baja calidad y la dificultad material y económica para purificar y separar el caucho y el metal entre sí y de los materiales textiles que forman el neumático, provoca que este sistema sea poco recomendable.

3.6 REENCAUCHADO Ó RENOVADO

El reencauchado de llantas o llantas es un proceso simple que envuelve la remoción de la huella o banda de rodamiento desde la cubierta, la restauración de la cubierta, y la colocación de una nueva banda de rodamiento. (SEMARNAT, 2002)

Las materias primas básicas usadas en este proceso son el caucho natural, caucho sintético, carbón negro, y nylon. Las llantas reencauchadas pueden ser usadas en toda clase de vehículos, los consumidores en América compran alrededor de 50 millones de llantas reencauchadas anualmente y las ventas en Taiwán exceden los 1.5 millones al año.

Estas ventas son y continuarán siendo exitosas debido a una serie de razones. Para empezar, las llantas reencauchadas son más baratas que las llantas nuevas, en promedio, el costo de una llanta reencauchada es 50% menor que una nueva, debido al uso de menor cantidad de materias primas para su producción. Además, con excepción del caucho natural, los materiales usados en el reencauchado son productos derivados del petróleo, por lo tanto, el reencauchado de llantas elimina grandes cantidades de desechos de productos derivados del petróleo y genera un rápido consumo de suministros de petróleo no renovables.

Actualmente existen 35 plantas de reencauchado en Taiwán, algunas de estas compañías han crecido a tal punto que están exportando sus plantas.

No hay duda que las ventajas del establecimiento de esta planta de reencauchado es un negocio que genera una buena rentabilidad, debido a su inversión relativamente baja, a sus costos de operación bajos y a su gran demanda.

3.6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Al llegar a la planta de tratamiento cada llanta es inspeccionada para determinar si es o no reencauchada.

Si es posible reencaucharla, se remueve la banda de rodamiento con una cuchilla giratoria de alta velocidad, el lugar dañado de la llanta es reparado y su envoltura queda lista para su cementado donde la envoltura reparada es revestida con un cemento de caucho, la banda de rodamiento nueva es pegada sobre la envoltura cementada. Las llantas son colocadas en moldes de curado (sistema convencional) o en tanques de curado (sistema precurado).

Este proceso fusiona la nueva banda y la envoltura conjuntamente. Respecto al sistema convencional, este paso forma también la banda matriz de la llanta. Cada una de las llantas es inspeccionada completamente, quedando lista para su comercialización.

3.6.2 PROCESO DE MANUFACTURA DE LA BANDA DE RODAMIENTO

La banda de rodamiento nueva es producida de un compuesto de caucho (consiste de caucho natural, caucho sintético, negro de humo y varios reactivos químicos). El compuesto de caucho es estrujado para formar la banda de rodamiento de la llanta. Este proceso de estrujado es el paso final del reencauchado convencional, observado en el proceso de curado.

3.7 DEGRADACIÓN CATALÍTICA

Este proceso es el tratamiento químico del hule, después del proceso criogénico vía descomposición catalítica, menos costoso, debido a la disponibilidad y eficiencia de los catalizadores que pueden utilizarse varias veces y a que las condiciones de degradación utilizadas son suaves al hacerse a una temperatura relativamente baja (entre 40 y 50 °C).

Esta alternativa puede tomar dos rutas después de la separación criogénica, suave o profunda. En el primer caso se obtienen hules reutilizables para la fabricación de nuevas llantas y en el segundo, hidrocarburos líquidos y solubles bien definidos, con peso molecular y estructura controlada, con lo que se pueden fabricar adhesivos.

CAPÍTULO 4

EFFECTO DE LOS CONTAMINANTES

La contaminación atmosférica hace referencia a la alteración de la atmósfera terrestre por la adición de gases y/o partículas (sólidas o líquidas) en suspensión en proporciones distintas a las naturales.

Se consideran gases contaminantes a los compuestos químicos en estado gaseoso que pueden ser más o menos ligeros que el aire y provocan enfermedades en los seres vivos y/o efectos de cambio climático en el planeta.

Estos gases se clasifican en dos grupos; los gases invernadero, que provocan el calentamiento global (H_2O , CO_2 , CH_4 , NO_x , O_3 y Clorofluorocarburos (CFC's)) y los gases contaminantes (compuestos químicos) que provocan degradación de ecosistemas y problemas de salud.

Se entiende por emisión contaminante, la generación o descarga de materia o energía, en cualquier cantidad, estado físico o forma, que al incorporarse, acumularse o actuar en los seres vivos, en la atmósfera, agua, suelo, subsuelo o cualquier elemento natural, afecte negativamente su composición o condición natural.

Se consideran partículas a compuestos químicos sólidos o líquidos de tamaño pequeño, del orden de micrómetros (μm), que equivale a la millonésima parte de 1 metro, y se les divide en dos grupos principales, a las más grandes se les denomina PM_{10} y a las más pequeñas, $PM_{2.5}$.

Las PM_{10} miden entre 2.5 y 10 μm de diámetro y causan efectos menos severos en la salud debido a la facilidad de adherencia a las paredes del sistema respiratorio, o pueden acunarse en los pasajes estrechos de los pulmones

Las $PM_{2.5}$ miden menos de 2.5 μm de diámetro y causan graves efectos en la salud de los seres vivos ya que pueden pasar fácilmente a través de las vías respiratorias más pequeñas.

Los efectos de aspiración de estas partículas generan síntomas como tos, dificultad para respirar, agravan el asma, dañan los pulmones (incluyendo la disminución de la función del pulmón y enfermedades respiratorias de por vida), muerte prematura en individuos con enfermedades existentes del corazón y del pulmón.

Los contaminantes atmosféricos a su vez se catalogan por su emisión en contaminantes primarios, que son los emitidos directamente por una fuente, y los secundarios, que son producto de reacciones químicas posteriores con los compuestos presentes en la atmósfera originando nuevos contaminantes.

El tiempo que un contaminante permanece en el aire se conoce con el nombre de tiempo de residencia. Este tiempo es más o menos largo según el tipo de contaminante y el estado de la atmósfera. Para los gases, el tiempo de residencia depende de su capacidad de reacción, los más reactivos permanecen menos tiempo en el aire. Para las partículas depende de su medida.

En especies de fase gaseosa, lo más común es usar unidades en partes por millón (ppm), partes por billón (ppb) y partes por trillón (ppt). Estas unidades expresan el número de moléculas del contaminante en un millón (10^6), en un billón (10^9) o un trillón (10^{12}) de moléculas en el aire respectivamente.

Para determinación de masa por unidad de volumen en especies gaseosas generalmente se utilizan los microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

4.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El CO es un gas inodoro, incoloro, inflamable, no irritante y altamente tóxico; es menos pesado que el aire, por lo que se acumula en las zonas altas (de ahí la conveniencia de andar agachado en los incendios) y se origina de la combustión incompleta de los combustibles orgánicos, es decir, en una situación de falta de oxígeno que imposibilita la oxidación completa a CO₂.

Es una sustancia altamente tóxica si se respira, aún en cantidades moderadas, porque se combina con la hemoglobina de la sangre e impide el transporte de oxígeno a los tejidos y por tanto la respiración pudiendo causar la muerte por envenenamiento en pocos minutos.

Debido a su falta de olor e irritación, la exposición a este contaminante puede pasar completamente desapercibida y habiendo inhalado una cantidad bastante grande de CO (teniendo un 75% de la hemoglobina con monóxido de carbono) la única forma de sobrevivir es respirando oxígeno puro.

Los síntomas de intoxicación dependen de la concentración y rapidez con que se inhale el gas; la inhalación masiva y aguda de gas ciudad produce rápidamente la pérdida del conocimiento y parálisis respiratoria, la inhalación lenta de menor concentración de gas causa dolores de cabeza, mareos con zumbido de oídos, náuseas y vómitos; dolores abdominales y sensación de palpitaciones, se puede llegar hasta el coma, adquiriendo la piel una típica coloración rojo cereza, aunque no en todos los casos.

Una vez inhalado, el CO se combina con la hemoglobina de la sangre (hasta 250 veces más fácilmente que con el oxígeno) y se produce el compuesto denominado carboxihemoglobina, que resulta unas 200 veces más difícil de separar que el compuesto de la hemoglobina con el oxígeno.

El resultado que se produce es una hipoxia o disminución del nivel de oxígeno en la sangre y tejidos, pudiendo producir necrólisis epidérmica tóxica, que es una

enfermedad cutánea poco frecuente, caracterizada por eritema epidérmico, necrosis superficial y erosiones cutáneas.

En ciertos casos de intoxicaciones agudas con recuperación completa, tras varias semanas de no encontrar síntoma alguno, aparece una secuela llamada Síndrome Tardío, que es una combinación de síntomas neurológicos, similar al Parkinson, junto con síntomas psiquiátricos y síntomas más sutiles como el déficit de memoria, disminución de capacidad de concentración, trastornos de personalidad, irritabilidad, mal humor y agresividad.

La EPA ratificó como norma de calidad del aire para el CO un valor máximo de concentración de 9 ppm en exposición de 8 horas una vez al año y la Secretaria de Salud Mexicana establece un límite máximo de 11 ppm ($12,595 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en el mismo rango.

4.2 CLORURO DE HIDRÓGENO (HCl)

Es un gas ligeramente amarillento, corrosivo, no inflamable, más pesado que el aire, de olor fuertemente irritante y cuando se expone al aire forma vapores corrosivos densos de color blanco. Al ser liberado a la atmósfera produce lluvia ácida.

Es irritante y corrosivo para cualquier tejido con el que tiene contacto, la exposición breve a bajos niveles, produce irritación de la garganta; a niveles medios produce respiración jadeante, estrechamiento de bronquiolos, coloración azul de la piel y acumulación de líquido en pulmones. La exposición a niveles altos puede producir hinchazón y espasmos de garganta y asfixia. (Ver **Tabla 4.2**)

Algunas personas pueden sufrir una reacción inflamatoria al cloruro de hidrógeno mejor conocida como Síndrome De Malfuncionamiento Reactivo De Las Vías Respiratorias (RADS, por las siglas en inglés), que es un tipo de asma causado por ciertas sustancias irritantes o corrosivas.

La exposición prolongada a bajos niveles puede causar problemas respiratorios, irritación de los ojos y la piel y descoloramiento de los dientes.

Tabla 4.2 Efectos en la Salud del HCl

Tipo de Exposición	Riesgo
Inhalación	Puede producir irritación, edema y corrosión del tracto respiratorio, bronquitis crónica. Se recomienda llevar a la persona a un lugar con aire fresco, mantenerla caliente y quieta. Si para la respiración practicar reanimación cardiopulmonar (RCP).
Piel	Puede producir quemaduras, úlceras, irritación. Remover de la zona afectada toda la vestimenta y calzados y hacer correr agua por al menos 20 minutos.
Ojos	Puede producir necrosis en la córnea, inflamación en el ojo, irritación ocular y nasal, úlcera nasal. Lavar el o los ojos expuestos con abundante agua por al menos 15 minutos.

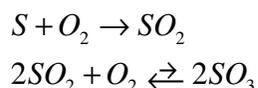
4.3 DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

En la combustión de las llantas usadas se generan dos óxidos de azufre, el dióxido de azufre (SO₂) que es un compuesto estable y el trióxido de azufre (SO₃) que es un compuesto inestable. Las dos especies son gases incoloros pero el SO₂ tiene un olor irritante.

El SO₂ es un gas estable, incoloro, de olor picante e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm, es 2.2 veces más pesado que el aire, por lo que se desplaza rápidamente en la atmósfera.

El SO₃ es un gas incoloro y muy reactivo que condensa fácilmente, en condiciones normales, no se encuentra en la atmósfera ya que reacciona rápidamente con el vapor de agua formando ácido sulfúrico.

Se producen SO₂ y SO₃ en la combustión de toda sustancia que contenga azufre a partir de dos reacciones:



En la segunda de ellas, el equilibrio se halla desplazado hacia el dióxido de azufre, debido a la inestabilidad del trióxido.

El principal efecto viene dado por las reacciones que originan ácido sulfúrico disuelto, el origen principal de la lluvia ácida. La constitución de la lluvia ácida puede variar, pero sus principales componentes son ácidos, tanto sulfúrico como clorhídrico o nítrico y sales de los mismos; el componente en mayor proporción es el sulfúrico por su mayor solubilidad.

La permanencia media de SO₂ en la atmósfera es de algunos días, y depende de la rapidez con la cual se convierta en ácido sulfúrico (H₂SO₄) por absorción de humedad (H₂O) y en partículas de sulfatos por acción de la radiación solar.

Los óxidos de azufre se hidratan fácilmente y al entrar en contacto con las mucosas conjuntival y respiratoria, producen irritación e inflamación aguda o crónica.

En función de la dosis, producen necrosis, alteración en los contenidos de azúcares y proteínas y pérdida de productividad en plantas.

En altas concentraciones, el dióxido de azufre puede ocasionar dificultad para respirar, irritación severa en vías respiratorias e incluso al interior de los pulmones por formación de partículas de ácido sulfúrico, ocasionando vulnerabilidad en las defensas.

Es causante de enfermedades respiratorias como broncoconstricción, bronquitis y traqueítis, pudiendo llegar a causar broncoespasmos en personas sensibles como los asmáticos, agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares existentes y la muerte.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un límite de concentración para preservar la salud pública menor que la Norma Oficial Mexicana de la Secretaría de Salud. (Ver **Tabla 4.3**)

Tabla 4.3 Exposición de SO₂

Límite Máximo permisible (µg/m³)		
Tiempo de Exposición	OMS	NOM-022-SSA1-1993
24 horas	100-150	341
Media Aritmética Anual	40-60	79

La concentración de dióxido de azufre en la Ciudad de México, se encuentra por debajo de la norma oficial establecida y la tendencia actual de este contaminante es una reducción de los niveles existentes, debido principalmente a cambios introducidos en los combustibles y a la práctica de técnicas de control en chimeneas.(INE 2004)

4.4 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Es un término genérico que hace referencia a un grupo de gases muy reactivos que contienen nitrógeno y oxígeno en diversas proporciones.

Se pueden formar ocho óxidos pero sólo tres son estables, el monóxido de dinitrógeno (N₂O), el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), siendo los más importantes en toxicidad, el NO y el NO₂.

La principal problemática viene dada por la contribución de estos óxidos al smog o niebla fotoquímica, así como por la formación de ácido nítrico y de lluvia ácida por disolución de éste; en la atmósfera baja contribuyen al calentamiento global, a la eutrofización en las zonas costeras y en la atmósfera alta contribuyen al oscurecimiento global.

Los niveles bajos de óxidos de nitrógeno en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones, y posiblemente causar tos y una sensación de falta de aliento, cansancio y náusea. La exposición a bajos niveles también puede producir acumulación de líquido en los pulmones 1 ó 2 días luego de la exposición. Respirar altos niveles de óxidos de nitrógeno puede rápidamente producir quemaduras, espasmos y dilatación de los tejidos en la garganta y las vías respiratorias superiores, reduciendo la oxigenación de los tejidos del cuerpo, produciendo acumulación de líquido en los pulmones y la muerte.

4.4.1 MONÓXIDO DE NITRÓGENO (NO)

El NO es un gas incoloro, con olor dulce penetrante, no inflamable, pero tóxico que interviene en procesos fotoquímicos troposféricos.

Este gas en el aire puede convertirse, más tarde, en ácido nítrico produciendo así lluvia ácida y participa en la destrucción de la capa de ozono.

El contacto con altas concentraciones de monóxido de nitrógeno de la piel u ojos causan quemaduras graves. (Ver **Tabla 4.4.1**)

Tabla 4.4.1 Riesgos de exposición de NO

Tipo de Exposición	Riesgos
Ingestión	Usado en medicina, pero las sobredosis son perjudiciales
Inhalación	Peligroso, puede ser fatal
Piel	Irritante
Ojos	Puede causar irritación

4.4.2 DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)

El NO₂ es un gas pardo-rojizo, no inflamable, tóxico, con fuerte olor desagradable e irritante, asfixiante y precursor de la formación de partículas de nitrato.

Afecta principalmente al sistema respiratorio, la exposición a corto plazo en altos niveles causa daños en las células pulmonares, mientras que la exposición a largo plazo en niveles bajos puede causar cambios irreversibles en el tejido pulmonar similares a un enfisema.

Su acumulación en el cuerpo humano, constituye un riesgo para las vías respiratorias ya que se ha comprobado que inicia, reactiva y puede alterar la capacidad de respuesta de las células en el proceso inflamatorio en casos de bronquitis crónica.

Tabla 4.4.2 Límites de Exposición de NO₂

Límite Máximo Permisible (µg/m³)				
Tiempo de Exposición	Unión Europea	Estados Unidos	Japón	México
24 horas	40	50	75-113	60
Media Aritmética Anual	200	100	400	395

4.5 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV's)

Son todos aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a dicha temperatura. Suelen presentar una cadena con un número de carbonos inferior a doce y contienen otros elementos como oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Existen más de mil compuestos pero los más abundantes en el aire son metano, tolueno, n-butano, i-pentano, etano, benceno, n-pentano, propano y etileno. Tienen un origen tanto natural como antropogénico. Participan activamente en numerosas reacciones, en la troposfera y en la estratosfera, contribuyendo a la formación del smog fotoquímico y al efecto invernadero. Los hidrocarburos pueden reaccionar con los óxidos de nitrógeno, bajo condiciones de fuerte radiación solar y producir la aparición del fenómeno de la niebla fotoquímica.

4.5.1 METANO (CH₄)

El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo, se encuentra en estado gaseoso, es incoloro y apenas soluble en agua en su fase líquida.

La mayor parte del metano tiene origen natural, a partir de la descomposición anaerobia de la materia orgánica y, en menor medida, de las actividades agrícolas, el tratamiento y eliminación de residuos y de combustibles fósiles.

El metano es un gas invernadero muy efectivo, tiene una capacidad de retención de calor 300 veces superior a la del CO₂, con una concentración atmosférica media actual entre 1,7 o 1,8 ppm (Lelieveld, 2006).

Las fuentes de emisión son muy variadas pero la destrucción del gas por los radicales OH del aire es rápida, de tal manera que la vida media del metano atmosférico es de tan sólo unos 12 años. Se puede absorber por inhalación, originando asfixia por disminución del contenido de oxígeno del aire, el contacto con el líquido o gas comprimido, puede causar congelación

4.5.2 BENCENO

Es el hidrocarburo con molécula cíclica más sencilla (ver **Figura 5.1**), es un gas incoloro de aroma dulce y sabor ligeramente amargo, es poco soluble en agua, inflamable, volátil.

Respirar, inhalar, aspirar, inspirar o ingerir niveles de benceno muy altos puede causar la muerte, mientras que niveles altos pueden causar somnolencia, mareo, alucinaciones, aceleración del latido del corazón o taquicardia, dolores de cabeza, migrañas, temblores, tiritar, confusión y pérdida del conocimiento. En el aspecto psicológico causa cambios de carácter, se tornan agresivo y resentido, casi bipolar.

La exposición de larga duración se manifiesta en la sangre, produciendo efectos nocivos en la médula ósea, causando una disminución en el número de glóbulos rojos, lo que conduce a anemia; también puede producir hemorragias y daños en el sistema inmunitario, aumentando así las posibilidades de contraer infecciones por inmunodepresión.

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la EPA han determinado que el benceno es carcinogénico en seres humanos y otros mamíferos. La exposición de larga duración a altos niveles de benceno en el aire puede producir leucemia y cáncer de colon.

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU. (OSHA) y la Secretaría del Trabajo y Previsión Social de México (STPS) han establecido un límite de $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante una jornada diaria de 8 horas, 40 horas semanales.

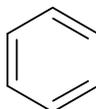


Figura 4.1 Benceno

4.5.3 TOLUENO

Es un líquido incoloro con un olor característico, no permanece mucho tiempo en el ambiente, no se concentra ni se acumula en cantidades significativas en animales.

Se considera sustancia nociva aunque su toxicidad es muy inferior a la del benceno, los epóxidos generados en la oxidación del anillo aromático (y al que se atribuye el poder cancerígeno del benceno) sólo se forman en una proporción inferior al 5 %.

El cuerpo elimina el tolueno en forma de ácido benzoico y ácido hipúrico, puede afectar al sistema nervioso; a niveles bajos o moderados pueden producir cansancio, confusión, debilidad, pérdida de la memoria, náusea, pérdida del apetito y pérdida de la audición y la vista. Estos síntomas generalmente desaparecen cuando la exposición termina.

Los vapores presentan un ligero efecto narcótico e irritan los ojos y el tracto respiratorio. Inhalar niveles altos de tolueno durante un período breve puede causar mareos o estado soñoliento, arritmia cardiaca, pérdida del conocimiento y, en casos extremos, la muerte. Respirar niveles de tolueno muy altos durante el embarazo puede hacer que niños nazcan con defectos de nacimiento, retraso mental y en el desarrollo.

El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis, afecta al sistema nervioso central, dando lugar a desórdenes psicológicos y dificultad en el aprendizaje.

La concentración máxima permitida de tolueno a nivel mundial es de 190 mg/m³.

Tabla 4.5.3 Riesgos de Exposición de Tolueno

Tipo de exposición	Riesgo
Inhalación	Vértigo, somnolencia, dolor de cabeza, náuseas, pérdida del conocimiento.
Piel	Piel seca, enrojecimiento
Ojos	Enrojecimiento, dolor.
Ingestión	Dolor abdominal, sensación de quemazón

4.6 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (PAH's)

Son un grupo de más de 100 compuestos derivados del benceno con un mayor o menor número de anillos bencénicos condensados que se forman durante la combustión incompleta.

Los PAH's se consideran compuestos orgánicos persistentes (COP's) debido a que pueden permanecer en el medioambiente durante largos periodos de tiempo sin alterar sus propiedades tóxicas. Sus propiedades semivolátiles les otorgan gran movilidad, son sólidos incoloros, blancos o amarillo-verde pálido, pueden encontrarse en el aire adheridos a partículas de polvo, presentan una baja solubilidad en agua y la mayoría son lipofílicos por lo que se pueden bioacumular y concentrar en sedimentos y suelos.

La toxicidad aumenta al aumentar el peso molecular y el carácter lipofílico del compuesto. Producen necrosis en plantas, menor crecimiento y producción y, en el hombre y otros animales, dolores de cabeza, irritación del aparato respiratorio, tienen propiedades teratogénicas, mutagénicas y carcinogénicas. (EPA)

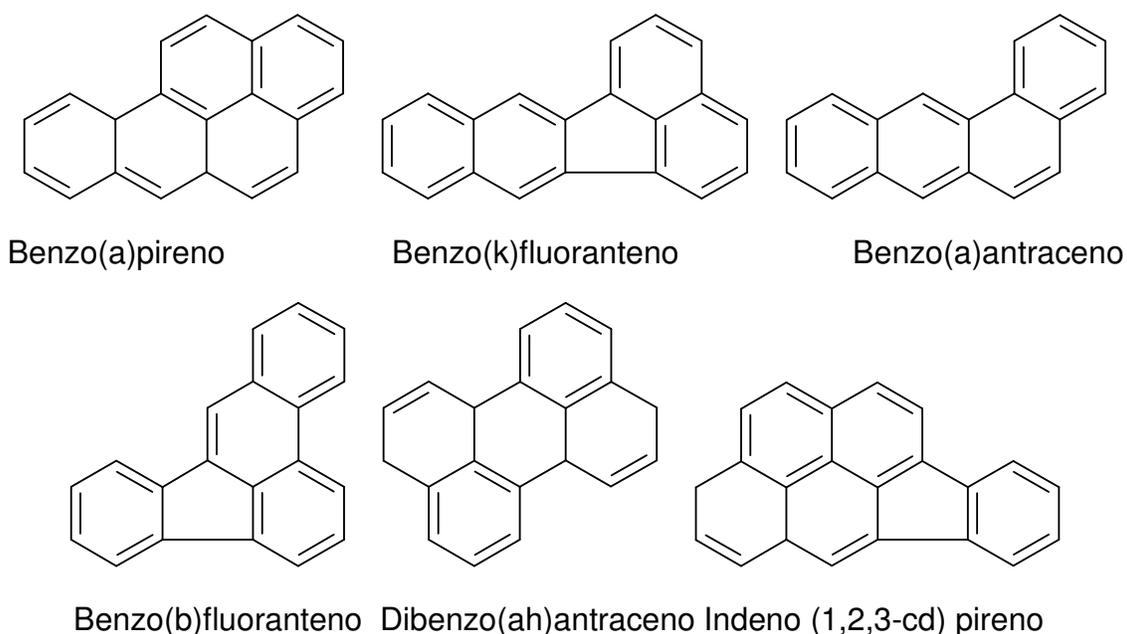


Figura 4.2 PAH's Carcinogénicos

4.7 DIOXINAS Y FURANOS

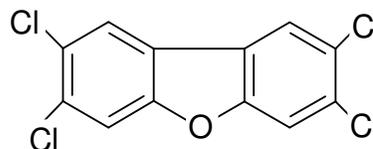
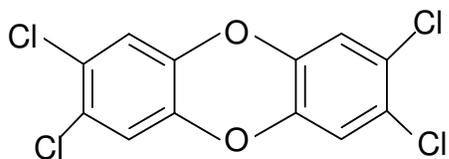
Compuestos químicos obtenidos a partir de procesos de combustión que implican al cloro. El término se aplica indistintamente a las policlorodibenzodioxinas (PCDF) y policlorodibenzofuranos (PCDF).

Son estables químicamente, poco biodegradables y muy solubles en las grasas, tendiendo a acumularse en suelos, sedimentos y tejidos orgánicos, pudiendo penetrar en la cadena alimentaria.

Se generan cuando se queman a bajas temperaturas algunos productos químicos como gasolina con plomo, plástico, papel o madera.

Existen varios cientos de dioxinas y furanos que son ligeramente o nada tóxicos y solamente una docena de ellos están entre las sustancias más tóxicas que se conocen.

A bastantes investigadores les preocupan más los efectos que a largo plazo pueden darse en personas expuestas a dosis muy bajas, que no provocan efectos apreciables a corto plazo. El problema con este tipo de sustancias es que no se eliminan con facilidad (tardan cinco años en reducirse a la mitad) ni se degradan y, por tanto, van acumulándose en los tejidos. En experimentos de laboratorio con animales se ha comprobado que dosis no letales pueden producir cáncer, defectos de nacimiento, reducción en la fertilidad y cambios en el sistema inmunitario.



(2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina) (2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-furano)

Figura 5.3 Fórmulas Ramificadas de Dioxina y Furano

4.8 BIFENILOS POLICLORADOS (BPC's)

Son una mezcla de hasta 209 compuestos clorados individuales, pueden ser líquidos aceitosos o sólidos incoloros (aunque a veces presentan color amarillento), inodoros e insaboros. No se conocen fuentes naturales y pueden existir como vapor en el aire.

Los BPC's aun pueden liberarse al medio ambiente desde sitios de residuos peligrosos que los contienen, por disposición ilegal o inapropiada de residuos industriales y productos de consumo, en escapes de transformadores antiguos que contienen BPC's, y al quemar ciertos residuos en incineradores.

No se degradan fácilmente en el ambiente por lo que pueden permanecer ahí por largo tiempo y pueden viajar largas distancias en el aire y ser depositados en áreas distantes del lugar de liberación.

La toxicidad se dio a conocer a inicios de la década de los 70s, en 1976, bajo el Acta de Control de Sustancias Tóxicas de Estados Unidos se prohibió su producción, manipulación, distribución y comercialización. La misma prohibición se dio en el Reino Unido en 1986 como parte de una iniciativa de la Comunidad Económica Europea, CEE; sin embargo se reconoció que los BPC's seguirían existiendo en equipos ya construidos, por lo que el Reino Unido y otros países del Mar del Norte determinaron en la Tercera Conferencia del Mar del Norte de 1990, encarar y destruir definitivamente los BCP's a fines de 1999 y para los países que no pertenecen al Mar del Norte que participaron de la Convención de París, hasta el año 2010.

Fórmula molecular general es: $C_{12}H_{(8-X)}Cl_{(2+X)}$

En las plantas, los efectos se refieren principalmente a una disminución de la velocidad de la división celular y la fijación de CO_2 en algas, además de una inhibición del crecimiento.

En la fauna los BCP's pueden producir carcinogénesis, efectos mutagénicos teratogénicos y oncogénicos.

Las principales vías de ingestión de BCP's en los humanos son la inhalación y la comida, sobre todo en alimentos propensos a estar contaminados como pescados y mariscos.

Debido a la baja presión de vapor de estos compuestos, sólo un 25% aproximadamente del total ingerido es por esta vía.

Cuando son inhalados se acumulan principalmente en tejidos ricos en lípidos, como puede ser el tejido adiposo, el cerebro, hígado, etc. Se produce una transferencia de la madre al feto durante la gestación, pudiendo generar poco desarrollo neurológico y afectar a la función tiroidea al situarse en receptores específicos para estas hormonas.

Los síntomas derivados de una intoxicación por BCP's son náuseas, vómitos, pérdida de peso, dolores en el bajo vientre, incremento de secreciones oculares, ictericia, edemas, cansancio, pigmentación de las uñas, etc., además de efectos hepatotóxicos a medio y largo plazo.

El contacto con la vista produce enrojecimiento y dolor. La ingesta, produce dolor de cabeza y fiebre.

Se han detectado cambios en pacientes relacionados con desórdenes funcionales en el sistema nervioso, especialmente en la corteza cerebral, causando dolores de cabeza, vértigo, depresión, nerviosismo y fatiga.

El efecto que se observa más comúnmente en gente expuesta a altas concentraciones de BPC's son efectos a la piel como sequedad y enrojecimiento, en algunos casos se puede producir cloroacné (lesiones dérmicas severas) que en casos severos es doloroso y desfigurante.

Estudios en trabajadores expuestos han observado alteraciones en la sangre y la orina que pueden indicar daño al hígado. Es improbable que el nivel de exposición del público en general a los BPC's produzca efectos a la piel o al hígado.

4.9 ÓXIDO DE ZINC

Se encuentra en forma de polvo o cristales blancos, inodoros, que se pueden absorber por inhalación del aerosol, polvo, humos, ó ingestión. En exposición a corto plazo, irrita el tracto respiratorio, origina fiebre de los humos metálicos y los efectos pueden aparecer de forma no inmediata, los efectos de exposición a largo plazo con la piel puede producir dermatitis y la inhalación puede originar asma.

Los efectos nocivos generalmente se empiezan a manifestar a niveles de 10-15 veces más altos que la cantidad necesaria para mantener buena salud. La ingestión de grandes cantidades aun brevemente puede causar calambres estomacales, náusea y vómitos. Si se ingieren grandes cantidades durante un período más prolongado pueden ocurrir anemia y disminución de los niveles del tipo de colesterol que es beneficioso.

Para proteger a los trabajadores, La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU. (*OSHA*, por sus siglas en inglés) ha establecido un límite de 1 miligramo por metro cúbico de aire (1 mg/m^3) para vapores de cloruro de zinc y de 5 mg/m^3 para óxido de zinc (polvos o vapores) en el aire del trabajo durante jornadas de 8 horas diarias, 40 horas a la semana. Asimismo, el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (*NIOSH*) ha establecido las mismas normas para una jornada diaria de 10 horas, 40 horas semanales.

Tabla 4.9 Riesgos de Exposición de Óxido de Zinc

Tipo de Exposición	Riesgo
Inhalación	Dolor de cabeza, náuseas, vómitos, debilidad, fiebre.
Piel	-----
Ojos	Enrojecimiento, Dolor
Ingestión	Dolor abdominal, diarrea, náuseas, vómitos.

CAPÍTULO 5

PROGRAMAS Y LEGISLACIÓN EN LA REPÚBLICA MEXICANA

5.1 LEGISLACIÓN

En la República Mexicana existen diferentes leyes que dictan el manejo de los residuos sólidos y la protección del medio ambiente.

5.1.1 LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE

Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, última reforma publicada, 23 de mayo de 2006

Establece los principios de protección ambiental atmosférica, la cooperación estatal, federal y de empresas privadas para la regulación de contaminantes atmosféricos.

5.1.2 LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003, última reforma, 22 de mayo de 2006

Establece la forma en que deben ser desechadas y tratados los residuos sólidos dentro del país.

5.1.3 LEY AMBIENTAL DEL DISTRITO FEDERAL

Ley publicada en la gaceta Oficial del Distrito Federal el 13 de enero del 2000

Establece las formas de prevención de contaminación dentro del area del Distrito Federal

5.1.4 LEY DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS PARA EL DISTRITO FEDERAL

Establece a las llantas usadas como material de manejo especial.

5.2 PROGRAMAS ESTATALES

5.2.1 NORTE DEL PAÍS

La Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT por sus siglas) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por su siglas en ingles) tienen un programa para eliminar la presencia de millones de llantas de desecho a lo largo de la región fronteriza, donde las mayores concentraciones están en Baja California (425 mil llantas), El Centinela (1 millón 200 mil) y Ciudad Juárez (4 millones 500 mil).

El gobierno del estado de Baja California, la Cámara Nacional del Cemento y Cemex, crearon un programa llamado Frontera 2012 con el que se obtienen dos tipos de aprovechamiento de la llantas usadas, uno es como combustible alterno y el otro como mezcla en concreto para pavimentación.

En Tijuana, ya se han pavimentado calles con el concreto conocido como llancreto el cual posee las ventajas de durabilidad y seguridad tradicionales del concreto; además de permitir el consumo intensivo de llantas de desecho. Para pavimentar un tramo carretero de un kilómetro y dos carriles, se requieren alrededor de 28 mil llantas.

En el estado de Chihuahua existen mas de siete millones de llantas usadas por lo que se han dado diferentes programas de aprovechamiento, uno de los programas lo lleva a cabo la industria El Paso Electric que ha probado la gasificación de llantas usadas para desarrollar un combustible útil para hornos de ladrilleras, otro programa lo ha desarrollado Cementos Chihuahua, el cual realiza un coprocesamiento de llantas trituradas en su horno cementero utilizando más de 1 millón 500 mil llantas entre Septiembre de 2004 y Febrero de 2007.

En Ciudad Juárez, donde se genera una llanta de desecho por cada uno de los 650 mil vehículos que circulan por sus calles, se iniciaron las operaciones de la planta trituradora de llantas para convertirlas en combustible alterno.

5.2.2 CENTRO DEL PAÍS

En el Estado de México las empresas Goodyear y Apasco participan en el reaprovechamiento energético de llantas.

En Hidalgo, la empresa Llanset utiliza la criogenia, para la recuperación del caucho que es transformado en adoquines, topes, etc.

Existe la opción de reciclar sus materiales, hablamos principalmente de acero y hule. El primero se vende en fundidoras y el segundo, se puede mezclar con asfalto para elaborar nuevas fórmulas de pavimento, tapetes, suelas de huaraches, impermeabilizantes y muchas cosas más.

En la Ciudad de México, la empresa Recycling Planet fabrica lechada asfáltica ahulada para el pavimento de calles utilizando cinco mil llantas diarias, es decir un promedio anual de un millón 300 mil.

El gobierno estatal de Aguascalientes en coordinación con el Instituto del Medio Ambiente del Estado (IMAE) y la Empresa Ecoltec, iniciaron con la trituración de más de 2 mil 500 toneladas de llantas usadas que se encuentran en el relleno sanitario de San Nicolás.

En Colima, existe el programa “Si ya no las ruedas, ¡Dónalas!” donde se dispone de los llantas que ya han cumplido con su vida útil para utilizarlos como combustible en los hornos de la Cementera Apasco.

En el Distrito Federal se implementó un programa de monitoreo atmosférico llamado Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).

5.3 NORMAS OFICIALES MEXICANAS (NOM)

5.3.1 SECRETARÍA DE SALUD

La Secretaría de Salud ha emitido una serie de normas para establecer los valores máximos de contaminantes atmosféricos a los que la población puede ser expuesta. La **Tabla 5.1** muestra las normas correspondientes al tema.

Tabla 5.1 Normas Oficiales Mexicanas SSA

Salud Ambiental		D.O.F
NOM-020-SSA1-1993	Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O ₃) de la calidad del aire ambiente. Criterio para evaluar la calidad del aire.	30 oct. 2002
NOM-021-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población	23 dic. 1994
NOM-022-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre (SO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO ₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población	23 dic. 1994
NOM-023-SSA1-1993	Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO ₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población	23 dic. 1994
NOM-025-SSA1-1993	Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM ₁₀ y partículas menores de 2.5 micrómetros PM _{2.5} de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire. Modificación en D.O.F: 26 sept. 2005	23 dic. 1994

5.3.2 SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT)

SEMARNAT ha expedido una serie de normas ambientales en las cuales se establecen los límites máximos permisibles en emisiones atmosféricas en las industrias, la **Tabla 5.1** muestra las normas oficiales a las que se deben de apegar las plantas recicladoras de llantas.

Tabla 5.2 Normas Oficiales Mexicanas SEMARNAT

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA		
MEDICIÓN DE CONCENTRACIONES		D.O.F.
NOM-034-SEMARNAT-1993	Métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.	18/OCT/93
NOM-035-SEMARNAT-1993	Métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.	18/OCT/93
NOM-036-SEMARNAT-1993	Métodos de medición para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.	18/OCT/93
NOM-037-SEMARNAT-1993	Métodos de medición para determinar la concentración de dióxido de nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.	18/OCT/93
NOM-038-SEMARNAT-1993	Métodos de medición para determinar la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.	18/OCT/93

EMISIONES DE FUENTES FIJAS		D.O.F.
NOM-040-SEMARNAT-2002	Protección ambiental -Fabricación de cemento hidráulico- niveles máximos de emisión a la atmósfera. (Modificación D.O.F. 20-Abril-2004).	18/DIC/02
NOM-043-SEMARNAT-1993	Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.	22/OCT/93
NOM-075-SEMARNAT-1995	Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua-aceite de las refinerías de petróleo.	26/DIC/95
NOM-085-SEMARNAT-1994	Fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión. (Modificación D.O.F. 11-Nov -1997).	02/DIC/94
NOM-121-SEMARNAT-1997	Límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles (cov's) provenientes de las operaciones de recubrimiento de carrocerías nuevas en planta de automóviles, unidades de uso múltiple, de pasajeros y utilitarios; carga y camiones ligeros, así como el método para calcular sus emisiones. (Aclaración D.O.F. 09-Sep.-1998).	14/JUL/98

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las cementeras del país son los principales combatientes a las pilas de llantas que se encuentran en todo el país en los botaderos.

Las 31 plantas cementeras están certificadas como industria limpia y la mayor parte se han certificado en ISO 14001, demostrando que la industria del cemento en México realiza sus actividades con pleno respeto por el medio ambiente. (CANACEM)

La mejor manera de controlar la generación de llantas usadas como desecho es alargando su vida útil y esto se logra con varios procedimientos. El primer paso es verificar la presión de inflado de las llantas cada semana; se deben de rotar cada ocho o diez mil kilómetros, si se utilizan en la ciudad o el auto es de tracción delantera, se debe realizar en menor kilometraje.

Cada llanta del auto soporta un peso diferente generando un desgaste no uniforme, se recomienda revisar la alineación de un vehículo cada 5'000kms, cada cambio de aceite, cuando se instalen llantas nuevas, cuando se haga una reparación de llanta, cuando se hace rotación de llantas o cambio de posición. Al balancear las llantas se obtiene un mayor rendimiento, desgaste parejo, y la disminución en los costos de mantenimiento vehicular

El reencauchado se realiza por medio de las mismas industrias llanteras y se ahorra energía de producción y generación de contaminación atmosférica.

Cada año, la Ciudad de México, realiza un inventario de emisiones atmosféricas con estimaciones precisas en la cuantificación de contaminantes y se puede observar la disminución que ha habido en cuanto a gases invernaderos desde 1994 hasta el año 2004.

La generación de SO₂ y partículas PM₁₀ disminuyó debido principalmente a la reducción del contenido de azufre en los combustibles.

A pesar de que ya existen alternativas de tratamiento de las llantas, es común ver que la gente al cambiar sus llantas, las tira a la vuelta de la esquina o las deja a cargo del recolector de basura que a su vez las transporta hasta los basureros.

Al buscar información sobre la localización de los centros autorizados de acopio solamente se encontró la existencia de un centro de acopio en la dirección:

Eje 5 s/n esquina. Con Plan de Ayala, Col. Ejidos de Sta. Ma. Aztahuacan, Delegación Iztapalapa donde se recibe herramienta, maquinaria, refacciones, equipo y bienes muebles con número de inventario, acumulador, llanta segmentada, cámara, corbata de hule, metálico de segunda, motores, monoblocks, transmisiones y housing.

Al buscar otras opciones en la Zona Metropolitana del Valle de México solamente se encontró con que el Bordo Poniente, es en general, el basurero ha donde van a parar.

No existe un programa informativo de los centros de acopio, forzando así a simplemente tirarlos a la basura.

En cuanto a la incineración a cielo abierto es algo muy común en la ciudad debido a las festividades y manifestaciones, ya que en señales de protesta se queman llantas sin tomar en cuenta que las emisiones de la combustión incompleta dañaran su salud.

El mejor proceso de reciclaje, tomando en cuenta las condiciones de las llantas usadas, la generación de contaminantes y el costo es de renovación ya que no genera gases.

El proceso que le sigue en cuanto a conveniencia ambiental es el de trituración, pero se requiere de un comprador de caucho pulverizado para que se vuelva rentable.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

El proceso de trituración mecánica es el que más se apega a las necesidades ecológicas y de rentabilidad, ya que se obtiene hule reciclado granulado y su mercado se está expandiendo rápidamente.

Se utiliza como materia prima para llantas nuevas, se incorpora al concreto llamándose “llancreto”, con el cual se han pavimentado carreteras en la Unión Europea, en Estados Unidos y en México se utilizó en Tijuana. Posee las ventajas de durabilidad y seguridad tradicionales del concreto, le proporciona al pavimento características de flexibilidad y elasticidad que aumentan su vida útil por lo menos en un 50% a un costo efectivo menor que el pavimento convencional, además de permitir el consumo intensivo de llantas de desecho, para pavimentar un tramo carretero de un kilómetro y dos carriles, se requieren alrededor de 28 mil llantas trituradas.

Las asociaciones futbolísticas más importantes, la FIFA y la UEFA, en los últimos años han realizado múltiples estudios que respaldan las propiedades del pasto artificial (amortiguando golpes y daños a las articulaciones) hecho de hule reciclado, por lo que en la actualidad se utiliza en el 90% de los campos de césped sintético que hay en el mundo.

El hule reciclado también se utiliza en zonas infantiles, guarderías, columpios, arquitectura, paneles antivibratorios, paneles acústicos, tapetes y en la actualidad, en accesorios de vestir, como bolsas, zapatos, ya que es bastante suave y de un aspecto bastante original.

Con este proceso se utilizan un gran número de llantas y su reciclaje no necesita de equipo especial para la limpieza de las emisiones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adhikari, Maiti, Reclamation And Recycling Of Waste Rubber, Progress in Polymer Science, Vol. 25, 2000, (909-948)
2. Amari, Themelis, Resource Recovery From Used Rubber Tires, Resources Policy, Vol. 25, Issue 3, 1999, (179-188).
3. Asociación Nacional de Distribuidores de llantas (ANDELLAC) 2005
4. Barcenas A., Degradación De Hule Natural Vía Metátesis Por Catalizadores De Rutenio, Tesis Licenciatura, Facultad de Química, 1999.
5. Barrionuevo, Rama, *et al.* Programa de Simulación de chimeneas y Efectos Medio Ambientales, Tecnología del Medio ambiente, España, 2000 (32-39)
6. Cembureau, British Cement Association, 1997
7. Conferencia 2007 de la Asociación Europea de Reciclaje de Neumáticos (ETRA)
8. De Marini, Mutagenicity and Chemical Análisis of Emissions fro the open Burning of Scrap Rubber Tires, Environmental Science Technology, Vol. 28, 1994, (136-141)
9. García, Aguiar, Influencia De La Relación Estequiométrica En La Gasificación De Residuos De Cítrico, Cuba, 2003
10. Grupo Hulero Mexicano, Memorias Del Curso Ciencia Y Tecnología Del Hule, 1988
11. Hunt, Thermical Devulcanization , The Goodyear Tire & Rubber Company, 2000
12. Isayev, Ultrasonic devulcanization, The University of Akron, 2004
13. Kastner, Kaminsky, Recycle Plastics into Feedstocks, Hydrocarbon Processing. Vol. 74, 1995 (109-120).
14. Lanoir, Trouvé, Physical and Chemical Caharacterization of Automotive Shredder Residues, Waste Managment Research, Vol. 15, (267-276), 1997
15. Layman, Advances in Feedstock Recycling Offer Help With Plastic Waste, Chemical and Engineering News. Vol.71,1993.
16. Lelieveld, A Nasty Surprise In The Greenhouse Nature, (405-406, 443), 2006

17. Lemieux, Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, 2004, (1-32)
18. Lund, Herbert. Manual McGraw-Hill de reciclaje. Volumen I Cap. 18. Madrid; McGraw-Hill, 1996
19. McHarry, Reducir, Reusar Reciclar, 2000
20. Morton- Jones, Procesamiento de plásticos, Págs. 231-240
21. Padella, Recycling of Scrap Rubber by Mechanochemical Devulcanization, Italy, 2004
22. Powell, Tyre recycling bounces along, Resource Recycling, 1988, 22,23,70
23. Semarnat, Llantas usadas. Diagnostico de la situación actual en el D.F., 2002
24. Seymour, Carraher, Introducción a la química de los polímeros, Ed. Reverté, S.A., 1998
25. Vergnaud, Acetta, Reuse of scrap rubber powder recovered from old tires by vulcanization without new rubber, 2000
26. Warner, Arthur J. 1970. Solid Waste Management of Plastics, Washington, D.C. Manufacturing Chemists Association
27. Wicks, Shultz, Clark, Microwave Remedation of Hazardous and Radioactive Waste, Department of Energy, U.S., 2005

INTERNET

1. Cámara Nacional del Cemento, La Industria del Cemento en México, Medio Ambiente, 2007
http://www.canacem.org.mx/la_industria_medio_ambiente.htm
2. Sistema Internet de la Presidencia, Las buenas noticias también son noticias, 2007
<http://fox.presidencia.gob.mx/buenasnoticias/ecologia>
3. Chow, Petroquímica y sociedad, Capítulo 11 Hule Sintético, Sin Fecha de Publicación (SFP)
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec_17.html

4. Waste Magazine, España, (SFP)
<http://waste.ideal.es/neumaticos.htm>
5. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, Polímeros, (SFP)
<http://www.utp.edu.co/~publio17/plasticos.htm>
6. Instituto para la Sostenibilidad de los recursos, España, 2007
<http://www.isrcer.org>
7. Cámara de Senadores de la República Mexicana, 2007
<http://www.senado.gob.mx>
8. Waste Magazine, España, 2007
waste.ideal.es
9. Boletines Informativos del Presidente Municipal, Estado de Aguascalientes, México, 2007
www.ag.s.gob.mx
10. Longhurst, The Car Maintenance Bibles, 2007
http://www.carbibles.com/tyre_bible.html
11. García, ¿Llantas para desecho?, Iniciativa Mexicana de Aprendizaje para la Conservación, 2006
<http://www.imacmexico.org>
12. Frontera 2012, SEMARNAT, 2007
<http://www.semarnat.gob.mx/presenciainternacional/instrumentosambientales/Pages/frontera2012.aspx>
13. Ratema Internacional- Planos, Asesoría Técnica, Estudios de Impacto Ambiental, 2007
http://www.ratema.es/productos/reciclaje_de_neumaticos
14. Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados, 2007
<http://www.signus.es>
15. Planeta Azul, Periodismo Ambiental, 2007
<http://www.planetaazul.com.mx>
16. Taiwan Turnkey Project Association, Productos de Caucho y Plástico, Planta Recauchutadora de Llantas ó Neumáticos, (SFP)
<http://turnkey.taiwantrade.com.tw>