

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE PNEUS COMO
COMBUSTÍVEL EM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Relatório Final

Henrique Marchiori

São Paulo

2007

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE PNEUS COMO
COMBUSTÍVEL EM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia

Henrique Marchiori

Orientador: Professor Dr. Sílvio de Oliveira Jr.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Marchiori, Henrique

Estudo de viabilidade de utilização de pneus como combustível em geração de energia elétrica / H. Marchiori. – São Paulo, 2007.

54 páginas.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Geração de energia elétrica 2. Fontes alternativas de energia 3. Pneus (Reaproveitamento) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	O DESTINO DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS.....	2
3.	LEGISLAÇÃO AMBIENTAL.....	5
4.	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	7
5.	LEVANTAMENTO DE CASOS	10
5.1.	Elm Energy and Recycling Ltd.	10
5.2.	Beven Recycling Ltd.	11
5.3.	SIX Petrobras	11
6.	PROCESSOS DE PIRÓLISE E GASEIFICAÇÃO	13
6.1.	Caracterização dos Processos.....	13
6.2.	Composições dos Produtos	15
6.3.	Levantamento de Tecnologias.....	16
7.	PARÂMETROS DE PROJETO.....	20
8.	ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO.....	22
8.1.	Ciclo a Vapor com Sistema de Queima Estagiada	22
8.2.	Gaseificação Integrada a Ciclo Combinado.....	23
8.3.	Pirólise Integrada a Ciclo Motor de Combustão Interna.....	25
9.	CONCEPÇÃO	27
10.	MODELO FÍSICO.....	28
10.1.	Ciclo a Vapor - Balanço Térmico.....	28
10.2.	Gaseificação em Leito Fluidizado	31
1.	ANÁLISE ECONÔMICA.....	36
11.1.	Estimativa de Custo	36
11.2.	Geração de Energia Elétrica	38
2.	CONCLUSÕES	39
4.	BIBLIOGRAFIA	40
5.	ANEXOS.....	44
5.1.	Anexo I – Resolução Conama 258/99	44
5.2.	Anexo II – Resolução Conama 301/02.....	48
5.3.	Anexo III – Sumário de Emissões de Substâncias Orgânicas em Queima a Céu Aberto	51
5.4.	Anexo IV – Planilha de Cálculo – Balanços Térmicos e Mássicos das Câmaras de Gaseificação e Combustão.....	53
5.5.	Anexo V – Planilha de Dados – Características dos Combustíveis.....	54

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970 geram-se estudos decorrentes da preocupação com o destino de pneus descartados. Até então, no mundo todo, todo o material era disposto em aterros ou pilhas a céu aberto. Normas e legislações a respeito da destinação de pneus usados eram incipientes.

Na medida em que a frota mundial de veículos cresceu, agravaram-se os problemas com relação aos métodos de armazenamento. Apesar de o material ser considerado resíduo sólido inerte, as pilhas de pneus mostraram-se altamente propícias a incêndios. Na década de 1980 ocorreram incêndios de proporções históricas que marcaram o início de iniciativas públicas com relação ao problema no estado da Califórnia, no Canadá e na Alemanha.

De acordo com a EPA (United States Environmental Protection Agency) [5], a queima de pneus a céu aberto emite aproximadamente 6% da massa de combustível entre partículas sólidas e voláteis, sendo alguns altamente tóxicos e carcinogênicos.

À medida que surgiam as preocupações com as emissões atmosféricas e com o acúmulo do material, buscaram-se tecnologias para reutilizar os pneus acumulados. Entre as alternativas passou-se a consumi-los como combustível, introduzi-los como matéria prima na construção civil, no processamento de pavimentos de asfalto, na indústria de calçados entre outras.

Devido ao elevado poder calorífico, os pneus são amplamente utilizados como combustível, por exemplo, na geração termelétrica a resíduos, caldeiras a carvão e para produção de óleos e gases combustíveis. No entanto, estas aplicações são questionadas quanto aos níveis de emissões de poluentes.

Neste contexto, torna-se interessante avaliar a disponibilidade de pneus descartados para geração de energia próxima aos centros urbanos e a viabilidade econômica de utilizar exclusivamente pneus como combustível, com controle legalmente satisfatório de emissões. Uma configuração considerada mais adequada foi avaliada através de um modelo da planta, baseado em balanços mássicos, energéticos e dados experimentais.

2. O DESTINO DOS PNEUMÁTICOS INSERVÍVEIS

As primeiras formas desenvolvidas de eliminação de materiais poliméricos baseiam-se na queima direta do material. Em Wiesbaden, Alemanha, 1978, se deu a primeira iniciativa com relação à queima de pneus, utilizados como combustível secundário em calcinadores de cimento em regime experimental, na usina de Amoneburg. Realizaram-se três anos de teste com grau de substituição de até 50% em termos energéticos, não foram constatados maiores danos aos equipamentos ou queda na qualidade dos produtos.

Até o início da década de 1990 pouco havia com relação à legislação e normas a respeito da armazenagem ou eliminação de pneus. Mas, em decorrência das primeiras catástrofes ocorridas em depósitos ilegais começaram a surgir leis específicas. Um dos fatos marcantes foi o incêndio de Hagersville, Canadá, onde se incineraram 14 milhões de pneus num único evento.

Com relação ao assunto, as primeiras leis na América do Norte regulamentam a disposição dos inservíveis em depósitos a céu aberto. De acordo com Cimino [13], no estado da Califórnia, estão previstas elevadas multas e a prisão de infratores. No decorrer da década, a maioria dos estados passou a fiscalizar os destinos finais e criou programas de reciclagem dedicados. Atualmente, existe uma taxa de US\$ 4,00 paga na compra de cada unidade. Os recursos arrecadados compõem um fundo que financia pesquisas e projetos de recolhimento e reciclagem.

Nos Estados Unidos, em 2005, aproximadamente 85% dos pneus descartados foram legalmente destinados, segundo a Rubber Manufacturers Association [3]. Sendo 60% deste montante destinado à produção direta de energia ou produção de combustíveis. Além do uso como insumo energético, emprega-se pneumáticos triturados como componente de pavimentações asfálticas e outras aplicações em obras civis como leito de aterros sanitários, isolamentos térmicos e preenchimentos.

Na década de 1980, passou-se a analisar a possibilidade de substituir parcialmente combustíveis fósseis por diversos tipos de resíduos em fornos industriais e caldeiras de processos industriais e para geração de energia elétrica.

No Brasil, o uso como combustível concentra-se em fornos de cimento. Apesar de a queima de pneus a céu aberto emitir altas quantidades de poluentes, como dito anteriormente, é possível consumir pneus inteiros como combustível secundário em fornos de cimento, cumprindo exigências legais para incineração de resíduos, quanto ao tempo de permanência e a temperatura de combustão.

O processo de calcinação de cimento envolve substâncias, como gesso, capazes de seqüestrar enxofre. Além de agregar poluentes particulados ao produto final, filtrando-os dos gases nos precipitadores eletrostáticos. Não sendo necessárias grandes adaptações nos equipamentos, no mínimo, 20% em valor energético do combustível pode ser substituído por pneus.

As iniciativas mais concretas ocorrem em parcerias da indústria de pneumáticos com a indústria de cimento. A partir de 2002, a Cimpor Brasil, fabricante de cimentos de origem portuguesa, passou a queimar pneus em acordo assinado com a ANIP, Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos.

De acordo com Cimino [13], a associação se responsabiliza por recolher pneus nos centros urbanos em parceria com as prefeituras, envia-los para os centros de trituração em Jundiaí – SP e João Pessoa – BP, processa-los e abastecer as plantas de cimento. Coube à Cimpor importar os dois trituradores instalados nos centros, no valor total de aproximadamente R\$ 500.000,00. Cada triturador tem capacidade para 9,0 toneladas ou dois mil pneus por dia.

A Votorantim Cimentos [16] tem atualmente capacidade para consumir 20.000 toneladas de pneus por ano e acumula 1,5 milhões de carcaças consumidas. A própria empresa reconhece a incipiência desta prática no país, consideradas as 360.000 toneladas por ano co-processadas com cimento nos Estados Unidos, as 290.000 no Japão e as 450.000 na Europa.

Os fabricantes nacionais de cimento atualmente realizam estudos para maximizar a substituição de combustíveis fósseis por resíduos como pneus inservíveis já que o custo destes é consideravelmente inferior ao de combustíveis fósseis.

Estimativas quanto ao número de pneus inservíveis gerados anualmente no Brasil ficam entre 17 e 20 milhões, sendo seis milhões no estado de São Paulo e o número de unidades acumuladas em depósitos inadequados é calculado em no

mínimo 100 milhões. Güenther [14] coletou informações junto às prefeituras da grande São Paulo no ano de 2005.

Entre os municípios analisados apenas o de Santo André possuía estimativa oficial, de 150 pneus por dia coletados de lojas de serviço de troca e enviados a um aterro especializado. Os municípios de São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá e São Paulo não dispunham de estatísticas. Os pneus coletados na região do ABCD são geralmente picados e enviados a um aterro sanitário em Mauá.

A ANIP [10], afirma ter produzido e vendido 53,4 milhões de unidades em 2005. Destas, 18,2 milhões foram exportadas, 14,5 milhões foram vendidas a montadoras nacionais e 23,9 milhões foram para o mercado de reposição. Tendo como base de cálculo as vendas para reposição a associação apresenta a seguinte distribuição de mercados de pneus usados:

- Não descartados pelo consumidor após reposição: 36,9 %
- Mercados de segunda mão e de recondicionados: 9,9 %
- Destinados pelos fabricantes: 8,5 %
- Destinados a aterros ou “lixões” por prefeituras: 10,9 %
- Reprocessados por laminação para outros usos: 7,1 %
- Destinação não controlada: 26,7 %
- Total = Mercado de reposição: 100 %

Segundo o CEMPRE [19] – Compromisso Empresarial para Reciclagem, os pneus não passíveis de recuperação têm valor negativo, ou seja, pneus inservíveis acarretam em custos para os revendedores de pneus novos que eventualmente pagam para que o resíduo seja levado e fique em aterros.

3. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

De acordo com a NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, o rejeito de borracha é considerado de Classe III, ou seja, inerte, não contém metais pesados, não sofre lixiviação e não é solúvel em água. No entanto, Cimino [13] destaca os seguintes fatores como agravantes do problema de descarte dos pneumáticos inservíveis:

- O descarte em corpos d'água eventualmente provoca o assoreamento dos mesmos.
- Por serem pouco compressíveis e de degradação lenta, podem prejudicar a estabilidade e a vida útil de aterros sanitários.
- Os pneus inteiros podem reter gases em seu interior, o que diminuiu sua densidade e pode levá-los a emergir dos aterros danificando o isolamento da superfície dos mesmos. Isto permite o vazamento de fluidos e a proliferação de organismos patogênicos e de seus vetores.
- O acúmulo a céu aberto provoca considerável risco de incêndio acarretando em grandes quantidades de emissões atmosféricas de particulados e gases tóxicos além de óleos que acabam por contaminar o solo e as águas subterrâneas.
- O formato dos pneus tem a característica de acumular água, somado à incidência de luz solar, isto cria um ambiente adequado à reprodução de mosquitos vetores associados a uma série de patologias como a dengue e febre amarela.

A primeira lei instituída especificamente com relação a procedimentos de descarte de pneumáticos foi a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 258/99 (Anexo I), reeditada na Resolução CONAMA nº 301/02 (Anexo II). O CONAMA é um órgão federal com competência para editar normas, conceder licenças, definir parâmetros e aplicar recursos dirigidos ao meio ambiente.

Estas primeiras resoluções declaram responsabilidade legal aos fabricantes e importadores de pneumáticos quanto ao recolhimento e destinação final adequada do material. Desde o ano de 2002, os responsáveis ficaram obrigados a recolher uma carcaça para cada quatro unidades fabricadas ou importadas; desde o ano de 2003, recolher uma carcaça para cada duas unidades novas; desde 2004, para cada unidade nova, uma usada deve ser destinada e para cada quatro pneus reformados importados, cinco carcaças devem ser destinadas.

A lei ainda proibiu a disposição de pneus em aterros sanitários, meios aquáticos e queima a céu aberto ou de forma inadequada sendo que a destinação final deve atender a legislação ambiental e deve ser licenciada. Ficou permitida a criação de centrais temporárias de armazenamento contanto que cumpram as normas vigentes. Os fabricantes e importadores podem contratar serviços para dar fim ambientalmente adequado aos pneus ou fazê-lo por conta própria.

Dada a responsabilidade legal dos fabricantes, deve-se considerar o interesse dos mesmos em encontrar soluções que se enquadrem nas exigências. É esta a mais provável fonte de financiamento para iniciativas de reciclagem ou incineração de pneus.

4. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Segundo Goulart et al. [9] apud Williams et al. [7] e o relatório da Califórnia Integrated Waste Management Board [6], os pneus são compostos principalmente pelas seguintes substâncias:

- Borracha estirenobutadieno (SBR);
- Borracha natural (NR);
- Borracha polibutadieno (BR);
- Negro de fumo;
- Óleos;
- Enxofre;
- Aceleradores químicos;
- Ácido esteárico;
- Óxido de zinco;
- Fibras sintéticas;
- Aços;

O negro de fumo é utilizado para aumentar a resistência mecânica e à abrasão. Os óleos aromáticos utilizados têm a propriedade de dar maciez à borracha. A presença enxofre aumenta a resistência mecânica e à temperatura da borracha por proporcionar maior força de ligação entre as cadeias de polímeros. O acelerador ou catalisador do processo de vulcanização é geralmente um composto organo sulfúrico e os dois últimos componentes, o ácido esteárico e o óxido de zinco, servem como controladores do processo e conferem maior resistência ao pneu.

Para o presente estudo serão adotadas as composições médias elementares levantadas por indicadas na Figura 4.1, condizentes com dados publicados pela EPA [5]. Contudo, dada a diversidade de fabricantes, categorias e modelos de pneus, algumas outras análises têm resultados discrepantes a estas. Os números apresentados no relatório da Waste Management Board [6], Tabela 1, são significativamente

diferentes e os dados relativos à amostra de pneus picados diferem dos dados de pneus inteiros publicados no mesmo documento.

A Tabela 1 contém também valores de traços de metais pesados, a presença destes elementos deve ser levada em consideração no tratamento de efluentes nos casos de uso como combustível.

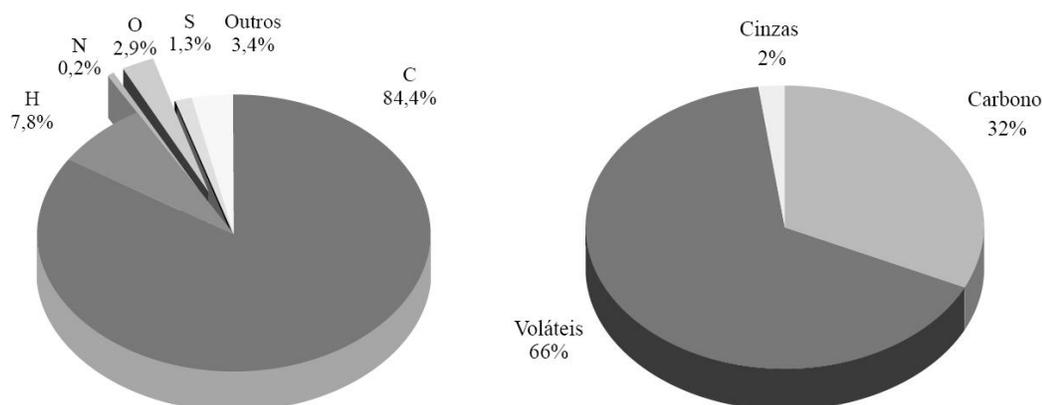


Figura 4.1.: Análise elementar e imediata de fragmentos de pneu, retirado de Goulart et al. [9].

De acordo com a Instrução Normativa número 8, de 2002, do IBAMA [12], para efeitos de fiscalização e controle, consideram-se as equivalências em peso de acordo com as classificações seguintes, das quais, para este trabalho, será considerada como média a de pneus para automóveis:

- Bicicleta: 0,45 Kg
- Motocicleta: 2,5 Kg
- Automóvel: 5,0 Kg
- Caminhoneta: 12,0 Kg
- Caminhões e Ônibus: 40,0 Kg
- Trator: 41,0 Kg
- Fora de estrada e terraplanagem: 84,0 Kg

Tabela 4.1: Composição de Pneumáticos Inteiros e Fragmentados, extraída do relatório de fatores ambientais da Waste Management Board [6].

Pneumáticos	Inteiros	Picados
Análise Imediata (%)		
Voláteis	79,78	83,98
Carbono Fixo	4,69	4,94
Cinzas	14,39	9,88
Umidade	1,14	1,20
Análise Elementar (% b.s.)		
C	74,50	77,60
H	6,00	10,40
O	3,00	0,00
S	1,50	2,00
N	0,50	
Cl	1,00	
Cinzas	13,50	10,00
Metais (mg/kg)		
Chumbo	51,50	51,50
Zinco	45.500	45.500
Arsênio	2,90	2,90
Cadmo	4,80	4,80
Mercúrio	0,30	0,30

5. LEVANTAMENTO DE CASOS

5.1. Elm Energy and Recycling Ltd.

A primeira planta dedicada à geração de energia elétrica a partir de pneus exclusivamente foi inaugurada em 1989 em Wolverhampton, West Midlands, Reino Unido. A usina tem capacidade nominal para 90.000 toneladas anuais de pneus sendo que opera em média com 70.000 toneladas por ano ou 250 por dia. São obtidas como subproduto 1.600 toneladas de aço por ano, 2.300 toneladas de óxido de zinco e 7.000 toneladas de gesso. A unidade tem potência líquida de 24 MWe.

A planta é composta por cinco conjuntos de incineradores, caldeiras a vapor e sistemas de filtragem de gás. As cinco caldeiras tocam uma única turbina a vapor.

Os sistemas de filtragem de gás compreendem, cada um, um filtro de mangas para remoção de óxido de zinco, um dessulfurizador tipo Venturi utilizando hidróxido de cálcio e um segundo filtro de mangas para partículas provenientes do dessulfurizador.

O processo de queima ocorre em quatro estágios. No primeiro, um lote comprimido com peso equivalente a 30 até 35 pneus de veículo de passeio é inserido numa câmara não oxigenada a 700°C. Neste estágio os hidrocarbonetos são volatilizados e os cabos de aço são soprados para fora da câmara.

O restante do material segue para os demais estágios de combustão quando a concentração de oxigênio aumenta progressivamente até níveis superiores ao estequiométrico. Sólidos não queimados são re-circulados de volta às câmaras de combustão. Somente após a combustão completa, os gases passam pelos tubos d'água da caldeira.

Este tipo de configuração exige a presença de uma reserva de calor suficiente para reiniciar a chama em caso de explosão. Especialmente quando são adicionados pneus inteiros, a concentração de voláteis tende a se distribuir não uniformemente no interior da câmara e no tempo. Somada a isso, a não uniformidade de convecção de oxigênio pode formar zonas com concentrações propícias a reações bruscas que provocam ondas de choque e podem extinguir a chama.

5.2. Beven Recycling Ltd.

Esta planta situada em Oxford, Reino Unido, utiliza duas retortas para pirólise de duas toneladas ou 300 pneus por dia. O material é adicionado inteiro ou fragmentado em bateladas de até uma tonelada. As retortas são preenchidas com nitrogênio a fim de evitar riscos de explosão e são aquecidas suspensas sobre fornalhas.

A partida é feita a óleo, após o início da reação o combustível é gradualmente substituído pelos próprios gases provenientes dos pneus. Os gases liberados passam por um pré-condensador e um condensador refrigerados a água. O gás é então tratado e seco, parte para uso e parte para armazenamento. O óleo extraído é armazenado na própria base do condensador enquanto o processo ocorre, depois, é bombeado para um tanque.

O material restante da retorta é descarregado e descansa até seu suficiente resfriamento quando então são separados os metais do negro de fumo. A proporção em massa final de produtos é de 23 a 27% de óleo, 40 a 42% de negro de fumo, 13 a 15% de aço e 19 a 22% de gás com base na massa do pneu inteiro.

5.3. SIX Petrobras

A unidade de processamento de xisto (SIX) da Petrobras, como sugere o nome, não é dedicada ao consumo exclusivo de pneumáticos. No entanto, torna-se interessante observar a tecnologia empregada uma vez que se trata da única planta a realizar pirólise de pneus em escala comercial no Brasil.

A unidade localiza-se em São Mateus do Sul, Paraná. A planta processa 7.800 toneladas de xisto betuminoso por dia produzindo óleo combustível, gás, nafta e outros através de pirólise a 500°C. Assim como o pneu inservível o xisto tem alto poder calorífico, mas se for incinerado na forma bruta dificilmente permite a reação completa de queima. Devido à semelhança, em 1998 iniciou-se testes para co-processados de pneus inservíveis misturados ao xisto. Desde então, nove milhões de pneus passaram pelo mesmo processo de pirólise na unidade.

A capacidade instalada permite processamento de 400 toneladas por dia (ou em torno de 3,2 milhões de carcaças por ano), mas segundo a Petrobras [15], a planta opera com 12% da carga (48 toneladas) por dificuldade de coleta de matéria prima.

6. PROCESSOS DE PIRÓLISE E GASEIFICAÇÃO

6.1. Caracterização dos Processos

O maior entrave técnico para utilização de pneus como combustível se deve à dificuldade encontrada em satisfazer condições adequadas à reação de combustão. As propriedades físicas e as dimensões dos pneus, mesmo fragmentados, restringem o contato por difusão com oxidantes permitindo que certa quantidade de combustível passe através da chama e esfrie sem poder oxidar caracterizando combustão incompleta.

Além da perda de eficiência, a emissão de combustível não queimado implica diretamente em problemas ambientais. Caracteristicamente produtos de combustão incompleta de hidrocarbonetos são: carbono particulado, monóxido de carbono e hidrocarbonetos.

Particularmente no caso da queima de pneu, é de suma importância que a emissão de hidrocarbonetos não queimados seja mínima. Entre as substâncias voláteis emitidas pelo aquecimento do material há, por exemplo, furanos, antracenos, dioxinas, bifenóis policlorinados e metais pesados todas altamente carcinogênicas. Dados apresentados pelo relatório da EPA [6], contidos no Anexo III, indicam que a queima a céu aberto de um quilograma de pneu libera 13,1 gramas de voláteis não queimados, 31,7 gramas de semi-voláteis e 14,9 gramas de sólidos orgânicos totalizando 59,7 gramas.

Conhecendo este problema, o material deve então ser reduzido a partículas suficientemente pequenas para que haja a difusão necessária. Ao mesmo tempo, no momento em que o combustível encontra o oxidante, deve haver temperatura suficiente para que seja atingida a energia de ativação da reação.

Existem três principais formas de decomposição de pneus: mecânica, química e térmica. A trituração mecânica é utilizada pelas indústrias de cimento e empresas de coleta de lixo que dispõem o material em aterros legalizados. A decomposição química ou desvulcanização, de maior custo, é utilizada por indústrias de fabricação

de laminados de borracha que preza pela manutenção das propriedades originais dos compostos dos pneus.

A decomposição térmica consiste em elevar a temperatura do material até o ponto em que haja volatilização e/ou ocorra fragmentação das cadeias orgânicas maiores. Como resultado obtém-se produtos gasosos, líquidos e particulados mais adequados à combustão controlada. Basicamente, são consideradas para a conversão em energia as variações deste tipo de processo.

Usualmente classifica-se este tipo de processo de acordo com o fator de excesso de ar (ϕ). Havendo oxidante suficiente para a reação completa ou ϕ maior que 1,0 a reação é chamada de combustão. Já não havendo oxidante em quantidade significativa as reações são globalmente endotérmicas, denomina-se o processo de pirólise. Denominam-se de gaseificação processos com oxidação parcial ou têm ϕ entre 0 e 1,0 e não demandam fonte externa de calor. Alguns autores consideram também a liquefação que equivale à gaseificação, mas visa à máxima produção de óleo.

O processo de pirólise é comumente aplicado à modificação de substâncias, não necessariamente decomposição. Modelos de equilíbrio e resultados experimentais coletados por Albright [11] descrevem transformação de metano, por exemplo, em diversas cadeias maiores de maior valor comercial, porém, a um alto custo energético.

A unidade SIX da Petrobras utiliza pirólise para obter substâncias orgânicas e depois as destila. Durante o processo já descrito, algumas substâncias são extraídas da massa de xisto e pneus por simples volatilização, outras provêm de decomposição.

Em restrição à importação de petróleo, em dadas circunstâncias políticas e históricas, a Alemanha e a África do Sul utilizaram amplamente pirólise e liquefação de carvão obtendo combustíveis para automóveis, plantas deste tipo ainda operam na África do Sul.

6.2. Composições dos Produtos

Naturalmente, os produtos obtidos em gaseificação variam de acordo com o nível de oxigênio disponível no processo. Goulart et al. [9] realizaram os ensaios com fator de excesso de ar de 40% e obtiveram as frações médias em massa abaixo:

Gases:	73 %
Óleos:	7 %
Cinzas:	20 %

A mistura de gases possui poder calorífico inferior (PCI) de 1.394 kJ/kg e contém as frações mássicas seguintes:

N ₂ :	75 %
CH ₄ :	3 %
CO ₂ :	9 %
CO:	3 %
H ₂ :	3 %
O ₂ :	7 %

A mistura de óleos possui PCI de 41.000 kJ/kg e apresentara a seguinte composição elementar:

H:	10,5 %
N:	0,3 %
C:	4,3 %
Outros:	84,9 %

E as cinzas contêm:

H:	0,8 %
N:	0,4 %
C:	81,0 %
Outros:	17,8 %

6.3. Levantamento de Tecnologias

Quanto à tecnologia de gaseificação, os maiores avanços concentram-se na geração termoelétrica a carvão. Algumas grandes plantas recentes, ao invés de consumir o combustível diretamente na fornalha das caldeiras, gaseificam-no e injetam o gás em câmaras de combustão para turbinas a gás acionando ciclos Brayton combinados a ciclos Rankine. Em geral, comparados aos de uma planta de ciclo simples, esta configuração alcança melhores níveis de emissão atmosférica de óxidos de enxofre e substâncias não queimadas devidos ao tratamento dos gases combustíveis e à combustão em duas etapas. A eficiência de ciclos supercríticos chega a ser superada, mas envolve equipamentos de altos custos de implantação e manutenção.

Em 2007, a Mitsubishi [17] coloca em marcha uma planta piloto de ciclo combinado integrado a gaseificação ou IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle). A planta tem capacidade total para 250 MW de potência líquida à eficiência de 42% que supera a de qualquer planta supercrítica de 700 a 1.000 MW instalada no Japão, segundo a fabricante.

A unidade opera com gaseificador de duplo estágio a injeção de ar. O primeiro estágio promove combustão completa de parte do carvão gerando gases quentes. No segundo estágio, estes gases quentes suprem a demanda de calor necessária à gaseificação do restante do combustível, reduzindo sua temperatura em 600°C. Como resultado, tem-se gás CO e H₂ proveniente da conversão de carbono e CO associados à água. Partículas finas eventualmente não gaseificadas são retornadas ao primeiro estágio.

Uma vez utilizado ar, é inerente que junto ao oxigênio, penetre grande quantidade de nitrogênio. A desvantagem principal nisso é a diluição dos gases combustíveis que resulta em baixo poder calorífico como anteriormente mostrado. Os reatores de turbinas a gás usualmente não se mantêm com combustíveis de poder calorífico baixo. A planta da Mitsubishi (Figura 6.2) dispõe de turbinas com câmaras de combustão específicas para tais gases. Outras configurações incluem unidades de separação de ar que concentram oxigênio a frações mássicas entre 90% e 95% reduzindo a diluição do combustível, porém, consumindo maior potência em

compressão. Entretanto, como mostra o fluxograma (Figura 6.1), mesmo plantas a ar têm separador independente para melhor controle da reação e ponto de operação.

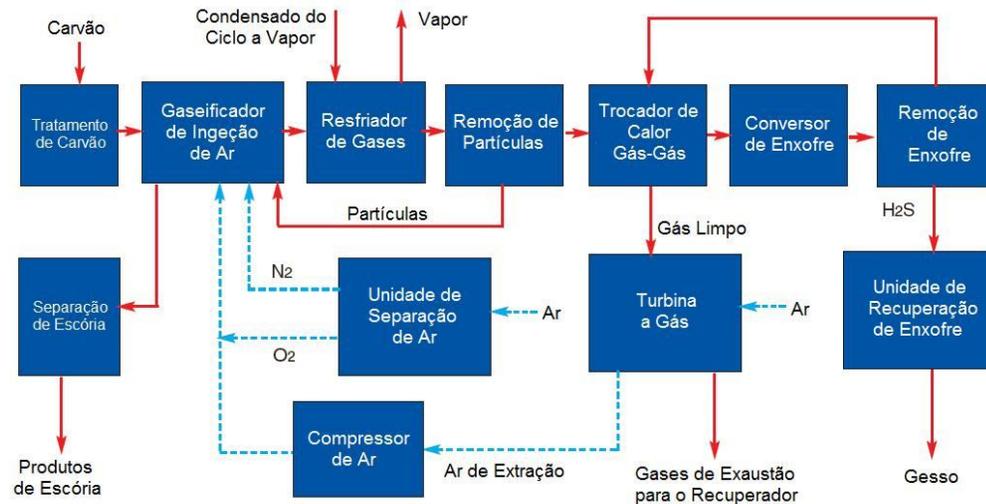


Figura 6.1.: Tradução de Fluxograma de Processos de um Ciclo Combinado Integrado à gaseificação, concebido pela Mitsubishi [17].

Este tipo de gaseificador é classificado como de leito fluidizado circulante pressurizado. Existem ainda outros tipos, os de leito fixo, os de leito fluidizado borbulhante e os de fluxo descendente de combustível. As principais variações entre as diferentes tecnologias e seus propósitos estão nos seguintes fatores:

- Temperatura de operação;
- Pressão de operação;
- Tempo de residência;
- Composição dos gases de entrada (nitrogênio, oxigênio, água);
- Granulometria do combustível;

Em usinas a carvão, entre 20% e 30% do PCI do combustível é consumido na gaseificação. Os gaseificadores de carvão utilizam combustível pulverizado seco ou misturado à água ou então triturado. Naturalmente, quanto maior a partícula mais tempo o material deve permanecer em alta temperatura.

Os fornos calcinadores de cimento geralmente são cilindros rotativos com alto tempo de residência (para o material calcinado). Normalmente, o combustível e os gases de combustão vão à contra corrente com o material. Para que pneus sejam lançados pelo combustor principal deve-se tritura-los antes, caso contrário não haveria tempo suficiente de residência para queima completa, tão pouco, equipamento adequado. Como a maioria dos pneus é radial, a vida útil das lâminas de trituradores tende a ser comprometida pelos impactos com cabos de aço. Isso somado ao gasto de energia elétrica eleva o custo de operação significativamente.

Se inseridos na “caixa de fumaça” do forno, entre o forno propriamente dito e os ciclones, os pneus passam através do forno a alta temperatura junto com o material em processo. Desta forma, é possível consumir pneus inteiros, em certas quantidades, em alguns fornos equipados com aberturas específicas.

O custo da trituração, no caso do presente projeto, leva a selecionar tecnologias que permitam consumir pneus inteiros. Sendo assim, duas configurações básicas de equipamento serão consideradas, a retorta, como a da SIX Petrobras e o gaseificador de leito fixo que permitem longos tempos de residência.

A retorta de pirólise tem a característica de poder manter a matéria prima em residência por um período tão longo quanto o necessário para que todo o material seja volatilizado. O gasto de energia com compressão de gases é mínimo, são necessários apenas um ventilador de ar de combustão e um exaustor de tiragem. Os parâmetros de operação são essencialmente o tempo, a temperatura e a pressão do processo.

A gaseificação em leito fluidizado é inviável para pneus inteiros devido à densidade e à dimensão dos mesmos. No entanto, a remoção das cinzas pode ser feita por transporte pneumático, através dos gases de combustão, o que permite o funcionamento contínuo do equipamento e a re-inserção de partículas não queimadas. O gaseificador (Figura 6.2) deve ter um combustor a gás ou óleo trabalhando com mínimo excesso de ar. A temperatura é controlável pela vazão de combustível. Os reagentes (oxigênio e/ou ar) devem ser inseridos separadamente para o controle da concentração de oxigênio.

Esta configuração mantém os pneus na câmara até que sejam desintegrados. As cinzas mais finas e menos densas são transportadas pelos gases, as mais densas caem através da grelha.

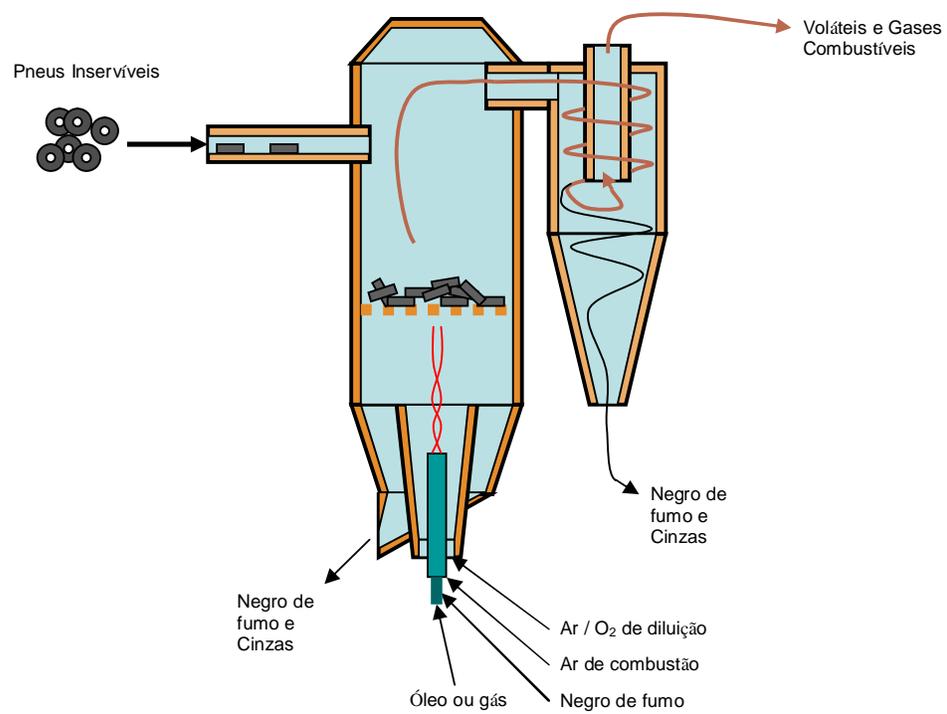


Figura 6.2.: Gaseificador de Leito Fixo.

7. PARÂMETROS DE PROJETO

Capacidade

Dada a estimativa de produção de três milhões de pneus inservíveis por ano na grande São Paulo e os demais números apresentados no segundo capítulo, a capacidade de projeto da planta será de 1,0 milhões de pneus, equivalente a 5.000 toneladas por ano ou 14.400 kg por dia (com um fator de marcha de 95%). Operando 24 horas por dia, o consumo médio deve ser de 510,0 kg/h.

A planta da Elm Energy, descrita no item 5.1, tem uma relação de potência por consumo de 0,27 KW_e por toneladas ano. Considerando esta relação, inicialmente estima-se para o dimensionamento uma potência de 1.350 KW_e.

Ambiente:

Temperatura:	25°C;
Pressão:	96.000 Pa;
Umidade absoluta do ar:	0,1 %;
Composição do ar seco:	O ₂ : 21,0 %; N ₂ : 79,0 %;

Características elementares dos Pneus (excluso aço):

C:	84,4 %
H:	7,8 %
O:	2,9 %
N:	0,2 %
S:	1,3 %
Outros:	3,4 %

Poder calorífico:

PCI = 35.547 kJ/kg (Goulart et al.[9])

Propriedades físicas (Goulart et al.[9]):

Calor específico (C_p):	990 J/kg.K;
Densidade:	1.357 kg/m ³ ;
Condutividade térmica (k):	0,28 W/m.K
Emissividade a 900K (ϵ):	0,90

Condição de recebimento:

Granulometria (diâmetro hidráulico médio):	30 mm
Massa média das partículas:	0,005 kg

Emissões:

O projeto deve atender as normas nacionais com relação à emissão de poluentes atmosféricos. Consideram-se mais exigentes os parâmetros estabelecidos pela Diretriz para Licenciamento de Processos de Destruição Térmica de Resíduos (DZ-1314), do Rio de Janeiro:

Temperatura mínima de chama:	1.200 °C;
Tempo de permanência à temperatura de chama:	2 s;
Teor mínimo de oxigênio na chaminé:	11%;

8. ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO

Com base nos levantamentos de tecnologias, foram concebidos três fluxogramas preliminares de processos, dos quais, um foi selecionado com base em aspectos qualitativos. Posteriormente é apresentado o modelo utilizado para o dimensionamento da planta, baseado em balanços mássicos, energéticos e dados experimentais.

8.1. Ciclo a Vapor com Sistema de Queima Estagiada

O fluxograma da Figura 8.1 representa a alternativa de ciclo simples a vapor com queima estagiada. Neste caso, todas as reações parciais da combustão num mesmo equipamento, em duas câmaras. A queima deve ocorrer de maneira controlada, sob alimentação progressiva de oxigênio. Ou seja, numa primeira etapa, a parte sólida do combustível deve ser convertida em líquidos e gases, com certo coeficiente de ar subestequiométrico e a parte líquida deve ser volatilizada. Desta forma, o combustível obtém temperatura, características físicas e químicas mais adequadas à combustão completa que ocorre numa segunda câmara.

Dado o potencial de contaminação, o sistema de tratamento de gases exigido requer controle preciso dos índices de diversas substâncias. Os gases de exaustão devem passar por precipitadores eletrostáticos o que requer preparação anterior dos gases. Este equipamento exige gases a baixas temperaturas e requer alta umidade para operar com maior eficiência. Havendo assim condições de precipitação de ácido sulfúrico, é necessário extrair o enxofre dos gases.

Os gases quentes gerados poderiam ser utilizados para geração de energia elétrica ou para outras aplicações industriais. Em alguns casos o sistema de tratamento de gases efluentes já empregado pode ser suficiente para remoção das substâncias poluentes.

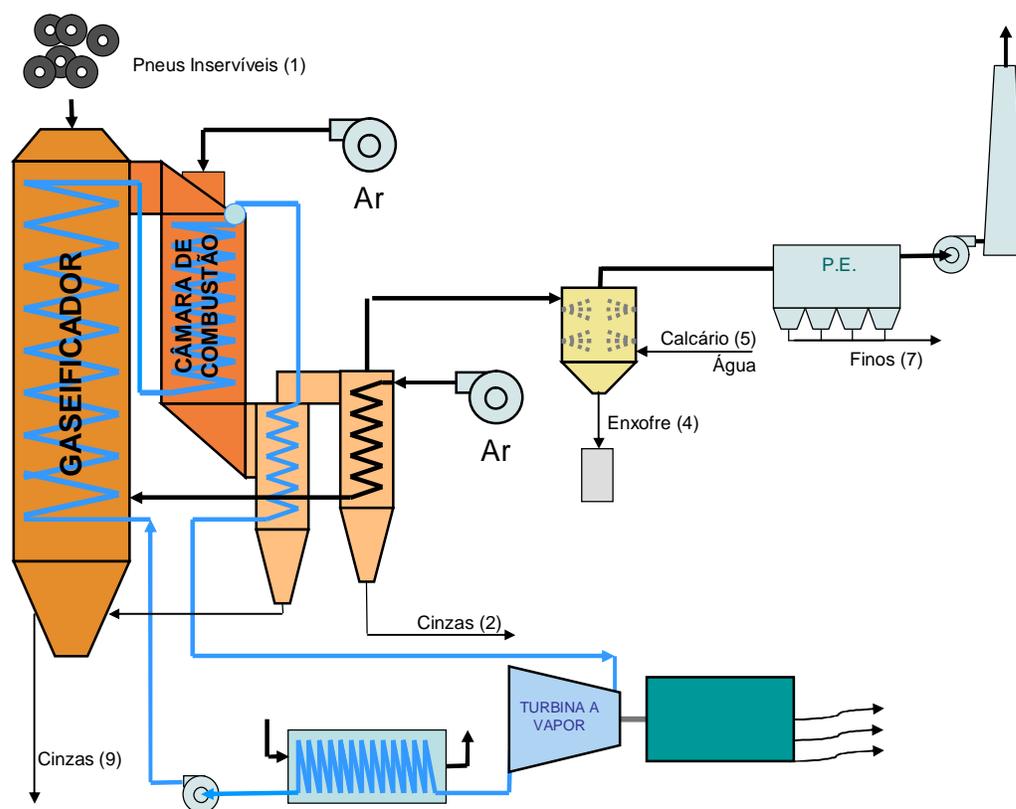


Figura 8.1.: Fluxograma de Processos para um Ciclo a Vapor com Sistema de Queima Estagiada.

8.2. Gaseificação Integrada a Ciclo Combinado

A configuração de ciclo combinado (Figura 8.2) é inspirada nas plantas a carvão. As menores usinas de IGCC pesquisadas têm potência líquida de 3 a 6 MW_e. Apesar do constante avanço tecnológico na área de micro-turbinas e máquinas de pequeno porte para geração local, não há disponibilidade de turbinas para potências adequadas adaptadas a combustíveis de baixo PCI. Assim, é necessário o uso de oxigênio concentrado para gaseificação. Além disso, equipamentos de alto custo como a turbina a gás e o número maior de equipamentos necessários tornam a instalação menos adequada para escalas pequenas de produção. Entre as três alternativas sugeridas, esta provavelmente teria maior rendimento térmico, porém o custo dificultaria a implantação do projeto.

Tratando-se de uma atividade nova no país e mesmo no mundo, deve-se considerar a complexidade de operação do sistema integrado. As turbinas a gás têm alta sensibilidade a variações das características dos combustíveis e a presença de enxofre. Uma vez que há pouco conhecimento sobre a gaseificação de pneus, esta alternativa não é adequada à proposta que visa não só a geração de energia elétrica, mas também a eliminação de resíduos a custos de implantação viáveis.

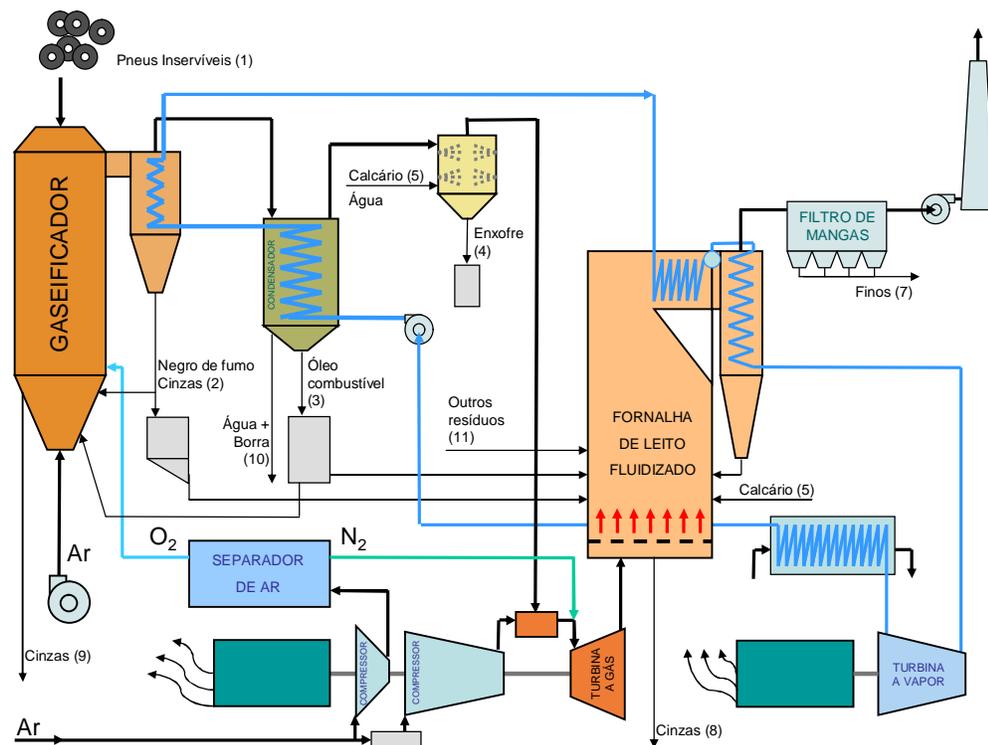


Figura 8.2.: Fluxograma de Processos para um Sistema de Gaseificação Integrada a Ciclo Combinado

8.3. Pirólise Integrada a Ciclo Motor de Combustão Interna

O trabalho de Goulart et al. [9] indica que existe possibilidade de obtenção de grandes frações de óleo através da gaseificação de pneus. Os experimentos geraram óleos de PCI de 40 MJ/Kg. Em comparação, o óleo diesel possui PCI de aproximadamente 46 MJ/Kg. Dependendo da análise de outras características do óleo de pneu existe a possibilidade de que estes sejam queimados em motores de combustão interna (Figura 8.3). A implantação e a operação deste sistema é a mais simples, cada sistema pode ser acionado independentemente. É necessária apenas uma reserva de combustível para partida.

Entretanto, comparado aos sistemas anteriores, este tipo de motor possui maior possibilidade de combustão incompleta. O maior risco nesta alternativa está na composição do óleo combustível, como dito anteriormente, entre os componentes do condensado há substâncias perigosas que devem ser decompostas.

Este tipo de motor é menos suscetível a contaminação do combustível com enxofre se comparado à turbina, mas, é necessária a limpeza do combustível e o controle da composição em função da viscosidade, ponto de detonação e outras características.

Há ainda a geração de negro de fumo que não pode ser queimado nos motores. Uma parte deste combustível poderia ser utilizada na pirólise, mas os excedentes dependeriam de mercado para venda ou outros sistemas de combustão.

Entre o uso de máquinas a combustão interna e o uso de gerador de vapor, certamente a segunda opção é mais robusta, pois depende menos das propriedades dos combustíveis que variam conforme o tipo de material alimentado e das condições de operação. O gerador de vapor é também menos suscetível à presença de enxofre e a possibilidade de emissão de substâncias orgânicas tóxicas. Estes fatores levam a concluir que é a melhor opção entre as três.

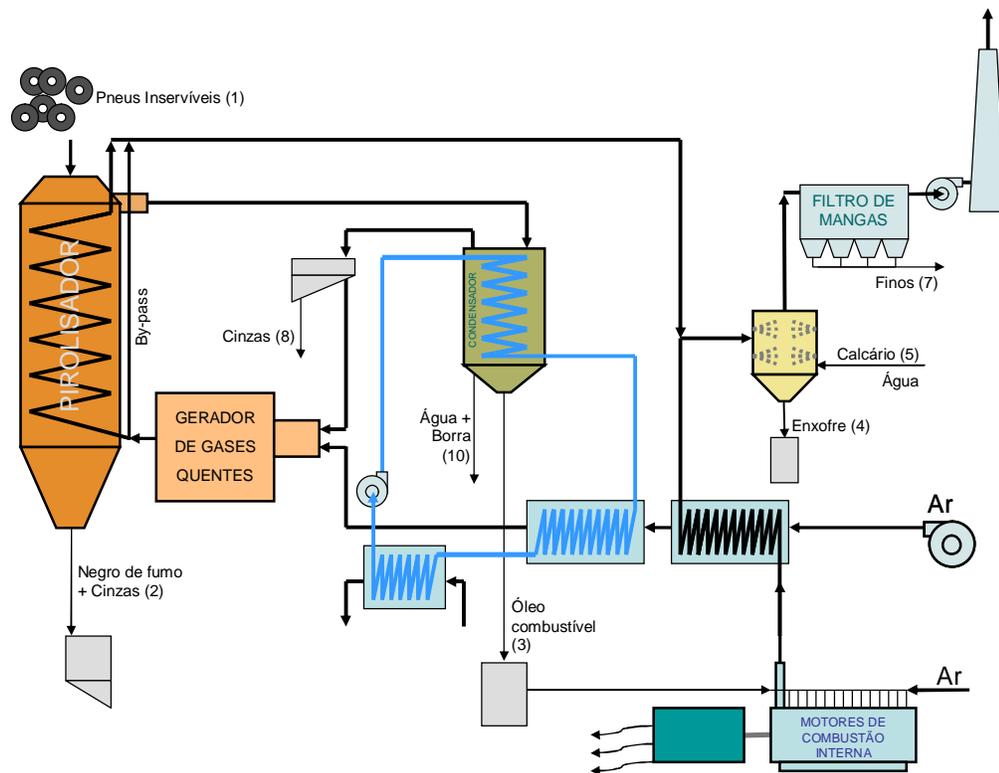


Figura 8.3.: Fluxograma de Processos para um Sistema de Pirólise Integrada a Ciclo Motor de Combustão Interna

9. CONCEPÇÃO

O sistema de combustão em estágios é independente da aplicação, ou seja, o projeto concentra-se na concepção de um gerador de gases quentes que é fisicamente separado do gerador de vapor. Esta separação se deve à necessidade de se manter a temperatura dos gases de combustão, de acordo com exigências legais. Para efeito de análise econômica e compreensão do porte da instalação, o modelo termodinâmico também incorpora os demais elementos básicos do ciclo a vapor necessários à geração elétrica.

O sistema de combustão consiste de um gaseificador de leito fluidizado seguido de uma câmara de combustão. Cada uma das câmaras contém queimadores piloto responsáveis pelo pré-aquecimento para posta em marcha e manutenção da temperatura, em caso instabilidade. Esta configuração já é operada para sistemas de incineração de resíduos urbanos, fabricada pela EBARA (Figura 9.1), de acordo com Fugimura [27]. Utiliza-se gaseificador de leito fluidizado devido à granulometria de entrada do combustível, que exige elevado tempo de permanência.

Teng et al. [23] apresenta raros resultados experimentais em escala piloto, para combustores de pneu de leito fluidizado, para fragmentos de 50 a 100 mm, como adotado no presente trabalho. Argumenta-se que este tipo de equipamento produz menor quantidade de óxidos de nitrogênio, devido à baixa temperatura e menos óxidos de enxofre, uma vez que permite adição de reagente (calcário) no próprio leito (Fugimura [27], Basu [28] e Teng et al. [23]).

A menor temperatura dos gases de combustão (~850°C) das fornalhas de leito fluidizado permite reduzir a taxa de dissociação de nitrogênio, por outro lado, essa temperatura não atende aos requisitos legais para incineração de resíduos.

Em relação à alternativa de sistema de combustão em leito fixo (grelha), o sistema em estágios tem a vantagem de ser mais compacto e de menor custo. Basu [28] menciona a elevada taxa de transferência de calor associada ao meio fluidizado, devida a condução térmica na interação entre partículas e devida a convecção térmica associada à elevada turbulência. Esta taxa está diretamente relacionada ao porte do

equipamento, já que os processos de pirólise e gaseificação de pneus iniciam-se com a elevação de temperatura do material, mais significativamente a partir da temperatura de 300 °C (Juma et al. [27] e Chen et al. [25]).

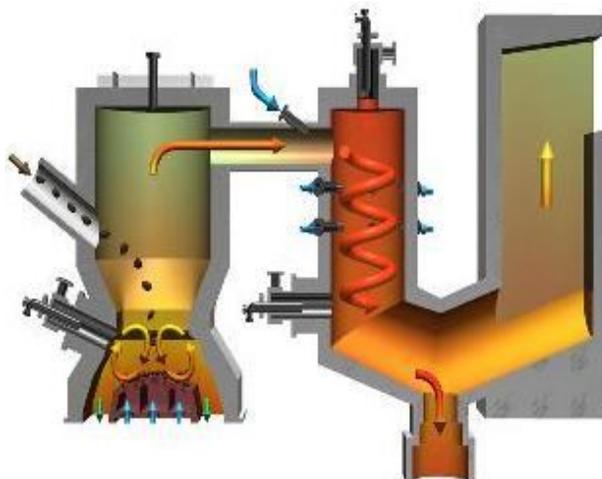


Figura 9.1.: Modelo esquemático de equipamento incineração por gaseificação seguida de combustão, concebido pela EBARA Company. Retirado de Fugimura [27].

10. MODELO FÍSICO

10.1. Ciclo a Vapor - Balanço Térmico

O modelo contempla a análise termodinâmica (balanço) dos dois estágios do equipamento (figura 10.1). Os balanços mássicos e energéticos se encontram na tabela do Anexo IV.

A estimativa das composições mássicas dos produtos e reagentes de gaseificação e combustão (Anexo V) levam em conta os resultados de Goulart et al. [9] citados anteriormente no texto. A energia de reação de gaseificação foi calculada considerando-se uma câmara adiabática por hipótese, através dos poderes caloríficos dos reagentes e produtos obtidos pelo mesmo autor. No segundo estágio, também adiabático, considera-se que ocorre combustão completa, ou seja, todo carbono dos gases combustíveis sai na forma de CO_2 e todo hidrogênio na forma de H_2O . Nestes volumes de controle, não há resfriamento dos gases devido à transferência de calor para geração de vapor.

O ciclo simplificado foi analisado conforme a Figura 10.1 e Tabelas 10.1 e 10.2, envolvendo as câmaras de gaseificação e combustão. Para cada equipamento é aplicada a primeira lei da termodinâmica para volumes de controle em regime permanente, desconsiderando energia cinética, e potencial. Para os equipamentos além do sistema de combustão, convencionais, foram adotadas características típicas, conforme Babcock [26]. Para o economizador, considerou-se a diferença de temperaturas de entrada e saída de 93 °C. As características de operação dos equipamentos foram determinadas em função da turbina a vapor de condensação, General Electric Classe C, com pressão de entrada de 8,0 MPa; temperatura de entrada de 480 °C; título de saída de 90%.

i. Gerador de Vapor

$$\text{Efetividade: } E = \frac{q_{\text{transferido}}}{q_{\text{máximo}}} \quad (1)$$

Potência útil: 4.129,0 kW

Efetividade: 81,0 %

Vazão de água: 5.970,1 kg/h

ii. Turbina a Vapor

$$\text{Eficiência isentrópica: } \eta_{ise} = \frac{h_e - h_s}{h_e - h_{s,ise}} \quad (2)$$

$$\text{Potência útil: } P = \eta_{ise} (h_e - h_s) \quad (3)$$

Fabricante: General Electric

Classe: C

Potência útil: 1.367,4 kW

Eficiência ise.: 88,0 %

Fluxo mássico: 5.970,1 kg/h

iii. Bomba

$$\text{Eficiência isentrópica: } \eta_{ise} = \frac{h_{s,ise} - h_e}{h_s - h_e} \quad (4)$$

$$\text{Potência: } P = \frac{v(p_s - p_e)}{\eta_{ise}} \quad (5)$$

Potência:	15,5	kW
Eficiência ise.:	88,0	%
Vol. específico:	0,00101	m ³ /kg

Tabela 10.1: Vazões mássicas, fluxos de entalpia e temperatura de ar e gases quentes, pontos conforme figura 10.1.

Ponto	1	2	3	4	5
Vazão mássica (kg/h)	582,0	18,0	6448,1	7023,7	2213,1
Temperatura (°C)	25,0	979,6	270,0	979,6	25,0
Fluxo de entalpia (kW)	0,0	4,77	404,3	2293,2	0,0
Ponto	6	7	8	9	10
Vazão mássica (kg/h)	9236,8	5100,0	9236,8	9236,8	6448,1
Temperatura (°C)	2136,8	25,0	307,0	214,0	25,0
Fluxo de entalpia (kW)	6151,1	0,0	597,2	764,4	0,0

Tabela 10.2: Entalpias específicas pressões absolutas e temperaturas da água, pontos conforme figura 10.1.

Ponto	A	B	C
Entalpia específica (kJ/kg)	338,80	344,6	3349
Pressão absoluta (kPa)	50	8000	8000
Temperatura (°C)	80,9	80,9	480

Considera-se que a temperatura de qualquer ponto interno ao leito é constante e vale 979,6 °C, conforme calculado anteriormente. Esta hipótese baseia-se em levantamentos experimentais de Oka [29], que mostram variações entre regiões do leito menores que 5 °C.

Tratando-se de um processo de combustão associado à geração de vapor, emprega-se gaseificadores à baixa pressão (ou gaseificadores atmosféricos). Caso o gás de síntese fosse injetado em turbina a gás ou motor de combustão interna haveria necessidade de pressurização do equipamento.

A principal característica a ser analisada em reatores de leito fluidizado é a velocidade de fluidização, necessária a suspensão das partículas, o que equivale a calcular a velocidade de queda livre das mesmas. Nesta condição, ocorre o equilíbrio entre as forças de empuxo, arrasto aerodinâmico e atração gravitacional (Basu [28]), conforme a equação abaixo:

$$F_g = F_E + F_D \quad (6)$$

Onde:

$$\text{A força gravitacional é: } F_g = m_p g \quad (7)$$

$$\text{A força de empuxo é: } F_E = \frac{m_p \rho_g g}{\rho_p} \quad (8)$$

$$\text{A força de arrasto é: } F_D = \frac{C_D \pi (u_p - u_g)^2 \rho_g d_p^2}{8} \quad (9)$$

Os índices g e p correspondem à partícula e ao gás respectivamente; u é a velocidade; ρ é a densidade; e C_d o coeficiente de arrasto, que equivale ao valor constante de 0,44 em escoamento turbulento com $500 < \text{Re} < 2 \times 10^5$ (Oka [29]).

O diâmetro equivalente (d_p) da partícula corresponde à média geométrica entre o maior e o menor diâmetro da partícula, conforme sugere Oka [29], no presente estudo considera-se esse valor médio como 30 mm. Frisa-se que este número não é adequado para o cálculo de área da partícula, para efeitos de transferência de calor e massa.

No equilíbrio, a velocidade relativa entre o gás e uma partícula é de 33,3 m/s. Com o fluxo de ar de gaseificação de 6.448 kg/h calcula-se o diâmetro da câmara em 0,33 m.

Dadas a área da seção transversal e a taxa de alimentação de combustível, a altura do leito é uma função do tempo de permanência das partículas. Por sua vez, o tempo de permanência depende da taxa de variação de massa e da densidade aparente do leito.

Juma et al. [21] coletou coeficientes obtidos por diversos outros autores para a equação diferencial seguinte que representa a taxa de variação da massa (m) em relação à massa final (m_f), para a reação global.

$$\frac{dm}{dt} = -A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot (m - m_f) \quad (10)$$

O fator pré-exponencial ($A=1,02 \times 10^7$) e a energia de ativação ($E=99,1 \text{ kJ/mol}$) foram medidos à temperatura inicial do ensaio de 20°C e à temperatura máxima atingida de 600°C , considerou-se a reação de ordem 1.

A temperatura foi calculada através do modelo de transferência de calor em leito fluidizado proposto por Oka [29], baseado em correlações empíricas, segundo o qual o número de Nusselt é:

$$Nu = 0,4(\text{Re}/\varepsilon)^{2/3} \text{Pr}^{1/3} \quad (11)$$

A correlação é válida para $\text{Re}/\varepsilon > 200$, onde ε é a fração de espaço vazio no leito, variando entre 65% e 75% para leitos fluidizados estacionários (não recirculantes). Assim, a densidade aparente é dada por:

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} = \rho_p(1 - \varepsilon) \quad (12)$$

A combinação destes modelos permite integrar a variação da massa das partículas de combustível (Figuras 10.2 e 10.3) e determinar a temperatura em função do tempo (Figura 10.4).

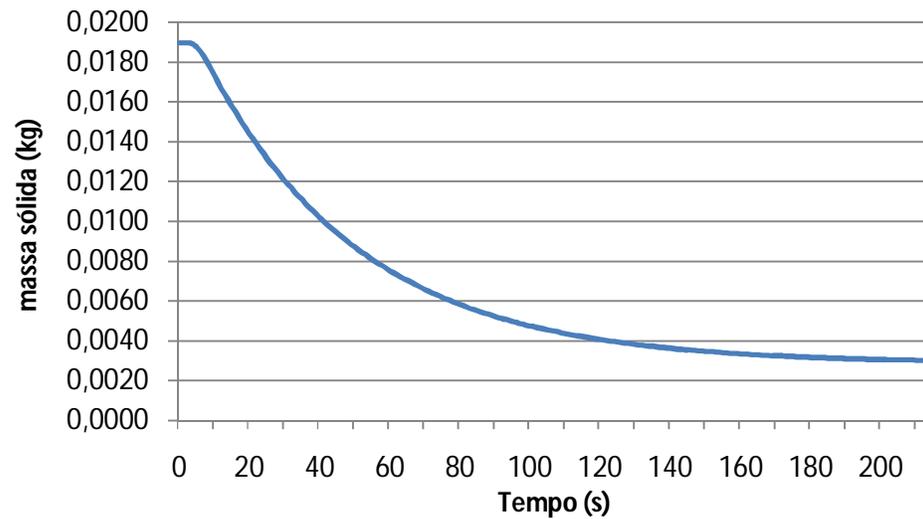


Figura 10.2.: Massa de partícula sólida de 0,019 kg de pneu em função do tempo.

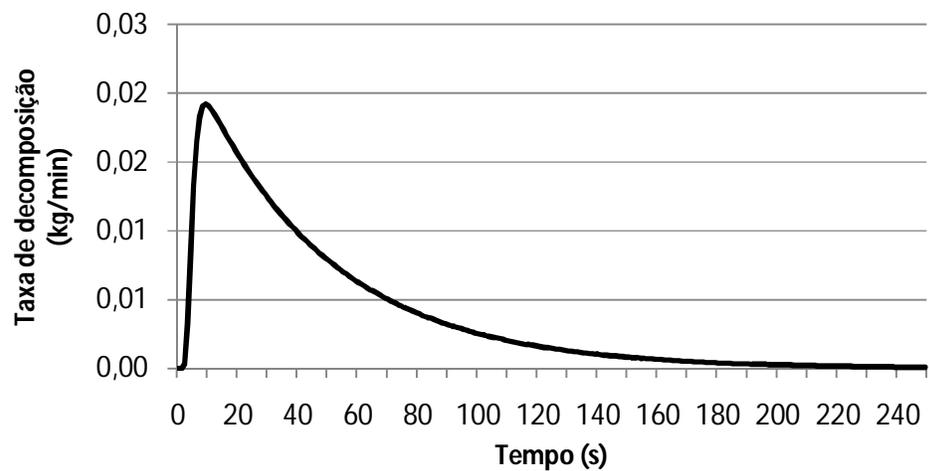


Figura 10.3.: Taxa de variação da massa em função do tempo.

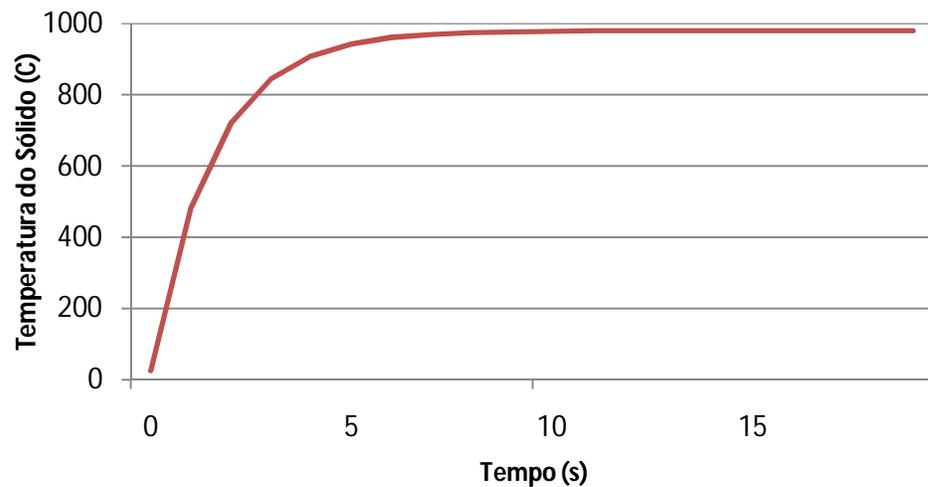


Figura 10.4.: Curva de aquecimento de partícula de pneu.

Estes resultados corroboram com dados experimentais em dois aspectos: (1) a taxa de transferência de calor fica entre 305 e 376 $\text{W/m}^2\text{K}$ o que corresponde às taxas típicas, de 200 a 500 $\text{W/m}^2\text{K}$, para câmaras de leito fluidizado (Basu [28] e Oka [29]); e (2) a gaseificação se inicia em temperaturas em torno de 400 °C, próxima ao resultado de Chen [25] (~330°C) e Juma [21] (~340°C).

Esta análise permite estimar a massa imersa no leito. Considerando o tempo de permanência de 200 segundos para partículas de 0,019 kg, a massa necessária à produção nominal é de 32,3 kg. Com $\varepsilon = 0,7$ a densidade aparente do leito é de 407 kg/m^3 .

1. ANÁLISE ECONÔMICA

11.1. Estimativa de Custo

Os equipamentos e serviços necessários à operação da planta são listados na tabela 11.1, com valores estimados de acordo com levantamentos junto a fabricantes de equipamentos.

Tabela 11.1: Orçamentos estimativos de equipamentos e serviços

Gaseificador; 600 kg/h – Termoquip [30]	
Gaseificador	R\$ 650.000
Interligação mecânica	R\$ 95.000
Interligação elétrica	R\$ 19.000
Montagem e partida	R\$ 162.000
Obras civis	R\$ 13.000
Frete (incluso seguro)	R\$ 10.000
Subtotal	R\$ 949.000
Câmara secundária; 7,0 MW – H Bremer [31]	
Gerador de gases quentes	R\$ 322.000
Interligação mecânica	R\$ 54.000
Interligação elétrica	R\$ 10.000
Montagem e partida	R\$ 80.000
Obras civis	R\$ 6.000
Frete (incluso seguro)	R\$ 5.000
Subtotal	R\$ 477.000

Gerador de vapor; 6.000 kg/h de vapor – H Bremer [31]	
Gerador de vapor	R\$ 750.000
Interligação com turbina	R\$ 150.000
Interligação elétrica	R\$ 30.000
Montagem e partida	R\$ 190.000
Obras civis	R\$ 24.000
Frete (incluso seguro)	R\$ 10.000
Subtotal	R\$ 1.154.000
Turbogerador; 1,4 MWe – General Electric [32]	
Turbina	R\$ 430.000
Gerador / Painéis	R\$ 252.000
Condensador atmosférico	R\$ 47.000
Torre de resfriamento / Bomba	R\$ 93.000
Interligação mecânica	R\$ 71.000
Interligação elétrica	R\$ 140.000
Montagem e partida	R\$ 108.000
Obras civis	R\$ 42.000
Frete (incluso seguro)	R\$ 12.000
Subtotal	R\$ 1.195.000
Outros equipamentos e serviços	
Precipitador eletrostático	R\$ 5.000.000
Automação (supervisório, painéis etc.)	R\$ 450.000
Interligações diversas	R\$ 1.500.000
Posta em marcha (engenharia)	R\$ 50.000
Contingências (aprox. 5%)	R\$ 1.500.000
Subtotal	R\$ 8.500.000

Totais	
Gaseificador	R\$ 949.000
Câmara de combustão (secundária)	R\$ 477.000
Gerador de vapor	R\$ 1.165.000
Turbogerador	R\$ 1.195.000
Precipitador eletrostático	R\$ 5.000.000
Outros	R\$ 3.500.000
TOTAL GERAL	R\$ 12.275.000

11.2. Geração de Energia Elétrica

A potência gerada de 1.367 kW a um preço de 150,00 R\$/kWh e fator de marcha de 95% (684 horas por mês) equivale a R\$ 140.254,00 de faturamento mensal. O custo de operação (incluindo a energia elétrica consumida internamente) é estimado em R\$ 36.000,00 mensais (30% do faturamento) não considerando qualquer gasto com obtenção de combustível.

Para o investimento de R\$ 12.275.000, o retorno simples (não considerando juros) levaria em torno de 87 meses. Em geral, investimentos com retorno de mais de cinco anos não são praticados pela iniciativa privada. Com o preço da energia elétrica considerado, a planta de geração de energia elétrica dependeria de subsídios governamentais ou auxílio da indústria de pneumáticos.

2. CONCLUSÕES

Os dados levantados mostram que existe disponibilidade de matéria prima. O projeto proposto considera o consumo de pneus provenientes apenas da região da grande São Paulo. De acordo com os dados levantados, o custo de recolhimento dos pneus ficaria possivelmente restrito ao serviço de frete e eventualmente seria subsidiado pelas fabricantes de pneus que atualmente encontram dificuldades em eliminar a cota que as resoluções do Conama as impoem.

A própria indústria de pneumáticos também é uma possível fonte de financiamento da implantação do projeto. Outras possibilidades viriam de fontes governamentais, dado o interesse público envolvido na manutenção da limpeza urbana e saneamento.

O custo dos equipamentos mostrou que o financiamento através da iniciativa privada é pouco plausível devido ao tempo de retorno simples do investimento de aproximadamente 87 meses.

Apesar de raras as informações publicadas a respeito de projetos em escala piloto ou comercial para geração de energia elétrica a partir de pneus, dados experimentais permitem concluir que existe viabilidade técnica para a gaseificação de pneus e combustão de gases de síntese, conforme proposto entre as soluções técnicas.

A simulação do ciclo a vapor permitiu calcular-se a potência líquida de 1.367 kW_e, para o consumo de 14,4 toneladas por dia, equivalente a aproximadamente um terço da produção da região da grande São Paulo. O valor se aproxima do valor de 2.3 kW por kg de pneu de plantas similares, encontradas na literatura. A eficiência térmica do ciclo é de 23,5%.

O modelo cinético associado ao modelo de transferência de calor em gaseificação, baseado em dados experimentais, permitiu calcular as dimensões básicas do sistema de combustão, dividido em uma região de reação subestequiométrica (gaseificação) e outra com excesso de ar.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] TURNS, S.R. – An Introduction to Combustion, McGraw-Hill, 2000.
- [2] KUO, J. – Principles of Combustion, Wiley, 1986.
- [3] RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION – Scrap Tire Markets in United States, 2006
- [4] GIERÉ, Reto, SMITH, Katherine, BLACKFORD, Mark – Chemical composition of fuels and emissions from a coal + tire combustion experiment in a power station, 2005.
- [5] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – Air Emissions from Scrap Tire Combustion, 1997.
- [6] CALIFORNIA INTEGRATED WASTE MANAGEMENT BOARD – Environmental Factors of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction, 1995.
- [7] CALIFORNIA INTEGRATED WASTE MANAGEMENT BOARD – Technology Evaluation and Economic Analysis of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction, 2006.
- [8] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – Markets for Scrap Tires, 1991.
- [9] GOULART, Eduardo A., MARIOTONI, Carlos A., SÀNCHEZ, Caio G. – A Utilização da Gaseificação de Pneus Usados em Leito Fluidizado para a Produção de Energéticos. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Outubro/Dezembro de 1999.

[10] ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – A Reciclagem de Pneus Usados – Evolução a Partir da Resolução CONAMA 258/99, VIII Semana FIESP do Meio Ambiente, junho de 2006.

[11] ALBRIGHT, Lyle F., CRYNES, Billy L., CORCORAM, William H. – Pyrolysis, Theory and Industrial Practice, New York, Academic Press, 1983.

[12] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA) – Instrução Normativa Nº 08, de 15 de Maio de 2002.

[13] CIMINO, Marly Alvarez – Gerenciamento de Pneus Inservíveis: Análise Crítica de Procedimentos Operacionais e Tecnologias para Minimização, Adotadas no Território Nacional, 2004.

[14] GÜNTHER, Wanda Maria Risso – Descarte de Pneus Inservíveis: um Problema na Grande São Paulo – XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 2002.

[15] PETROBRAS –Processo Petrosix em <www.petrobras.com.br>, maio de 2007.

[16] VOTORANTIM CIMENTOS – Responsabilidade Social e Ambiental, disponível em <www.votorantim-cimentos.com.br> em 3 de junho de 2007.

[17] MITSUBISHI – Japan 250 MW Coal Based IGCC Demo Plant Set for 2007 Start-up. Disponível em <www.mpshq.com> em 8 de junho de 2007.

[18] NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY – NETL, Coal Gasification as Alternative Fuel for Glass Industry, 2005.

[19] CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem, <www.cempre.com.br>, acessado em 10 de junho de 2007.

[20] HIGMAN, Christopher, BURGT, Maarten van der – Gasification, Gulf Professional Imprint, Elsevier, 2007.

[21] JUMA, M. – Pyrolysis and Combustion of Scrap Tire, *Petroleum & Coal* 48 (1), 15-26, 2006.

[21] PEŠEK, L. – Thermo-Mechanical Properties of Compressed Rubber Block, Institute of Thermomechanics ASCR, Prague, Czech Republic. 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18-21, 2007.

[22] SCALA, Fabrizio; CHIRONE, Riccardo; SALATINO, Piero – Fluidized Combustion of Tyre Derived Fuel. *Experimental Thermal and Fluid Science* 27, 465 - 471, 2003.

[23] TENG, Hsisheng; CHYANG, Chien-Song; SHANG, Sheng-Hui; HO, Jui-An – Characterization of Waste Tire Incineration in a Prototype Vortexing Fluidized Bed Combustor. *Journal of the Air and Waste Management Association* 47, 49 – 57, January 1997.

[24] LEE, Jung Soo; KIM, Sang Done – Gasification Kinetics of Waste Tire-Char with CO₂, in a Thermobalance Reactor. Department of Chemical Engineering and Energy & Environmental Research Center, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea, September 1995.

[25] CHEN, J.H.; CHEN, K.S.; TONG, L.Y. – On the Pyrolysis of Scrap Automotive Tires. *Journal of Hazardous Materials*, 43 – 55, 2001.

[26] BABCOCK & WILCOX – Steam - Its Generation and Use. 40th edition, 2004.

[27] FUJIMURA H.; OSHITA T.; NARUSE, K. – Fluidized-Bed Gasification and Slugging Combustion System. EBARA Corporation - Environmental Engineering Group Environmental Technology Development Center. Presented at the IT3 Conference, Philadelphia, USA.

[28] BASU, Prabir – Combustion and Gasification in Fluidized Beds. CRC – Taylor and Francis, 2006.

[29] OKA, Simeon N. – Fluidized Bed Combustion. Marcel Dekker Inc. New York, 2004.

[30] TERMOQUIP – Termoquip Engenharia Alternativa Ltda. <www.termoquip.com.br>, consulta em novembro de 2007

[31] H BREMER – H Bremer & Filhos Ltda. <www.bremer.com.br>, consulta em novembro de 2007

[32] GE ENERGY – General Electric. <www.gepower.com>, consulta em novembro de 2007

5. ANEXOS

5.1. Anexo I – Resolução Conama 258/99

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA
RESOLUÇÃO Nº 258, DE 26 DE AGOSTO DE 1999

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, no uso das atribuições que lhe são conferidas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990 e suas alterações, tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, e

Considerando que os pneumáticos inservíveis abandonados ou dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública;

Considerando que não há possibilidade de reaproveitamento desses pneumáticos inservíveis para uso veicular e nem para processos de reforma, tais como recapagem, recauchutagem e remoldagem;

Considerando que uma parte dos pneumáticos novos, depois de usados, pode ser utilizada como matéria prima em processos de reciclagem;

Considerando a necessidade de dar destinação final, de forma ambientalmente adequada e segura, aos pneumáticos inservíveis, resolve:

Art.1º As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas.

Parágrafo único. As empresas que realizam processos de reforma ou de destinação final ambientalmente adequada de pneumáticos ficam dispensadas de atender ao disposto neste artigo, exclusivamente no que se refere a utilização dos quantitativos de pneumáticos coletados no território nacional.

Art. 2º Para os fins do disposto nesta Resolução, considera-se:

I - pneu ou pneumático: todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço utilizados para rodagem em veículos;

II - pneu ou pneumático novo: aquele que nunca foi utilizado para rodagem sob qualquer forma, enquadrando-se, para efeito de importação, no código 4011 da Tarifa Externa Comum-TEC;

III - pneu ou pneumático reformado: todo pneumático que foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem, enquadrando-se, para efeitos de importação, no código 4012.10 da Tarifa Externa Comum-TEC;

IV - pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional.

Art. 3º Os prazos e quantidades para coleta e destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneumáticos inservíveis de que trata esta Resolução, são os seguintes:

I - a partir de 1º de janeiro de 2002: para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

II - a partir de 1º de janeiro de 2003: para cada dois pneus novos fabricados no País ou pneus importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

III - a partir de 1º de janeiro de 2004:

a) para cada um pneu novo fabricado no País ou pneu novo importado, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

b) para cada quatro pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;

IV - a partir de 1º de janeiro de 2005:

a) para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus novos importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;

b) para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a quatro pneus inservíveis.

Parágrafo único. O disposto neste artigo não se aplica aos pneumáticos exportados ou aos que equipam veículos exportados pelo País.

Art. 4º No quinto ano de vigência desta Resolução, o CONAMA, após avaliação a ser procedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, reavaliará as normas e procedimentos estabelecidos nesta Resolução.

Art. 5º O IBAMA poderá adotar, para efeito de fiscalização e controle, a equivalência em peso dos pneumáticos inservíveis.

Art. 6º As empresas importadoras deverão, a partir de 1º de janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, previamente aos embarques no exterior, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades a serem importadas, para efeitos de liberação de importação junto ao Departamento de Operações de Comércio Exterior-DECEX, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

Art. 7º As empresas fabricantes de pneumáticos deverão, a partir de 1º de janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, anualmente, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades fabricadas.

Art. 8º Os fabricantes e os importadores de pneumáticos poderão efetuar a destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneus inservíveis de sua responsabilidade, em instalações próprias ou mediante contratação de serviços especializados de terceiros.

Parágrafo único. As instalações para o processamento de pneus inservíveis e a destinação final deverão atender ao disposto na legislação ambiental em vigor, inclusive no que se refere ao licenciamento ambiental.

Art. 9º A partir da data de publicação desta Resolução fica proibida a destinação final inadequada de pneumáticos inservíveis, tais como a disposição em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços, e queima a céu aberto.

Art. 10. Os fabricantes e os importadores poderão criar centrais de recepção de pneus inservíveis, a serem localizadas e instaladas de acordo com as normas ambientais e demais normas vigentes, para armazenamento temporário e posterior destinação final ambientalmente segura e adequada.

Art. 11. Os distribuidores, os revendedores e os consumidores finais de pneus, em articulação com os fabricantes, importadores e Poder Público, deverão colaborar na adoção de procedimentos, visando implementar a coleta dos pneus inservíveis existentes no País.

Art. 12. O não cumprimento do disposto nesta Resolução implicará as sanções estabelecidas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, regulamentada pelo Decreto nº 3.179, de 21 de setembro de 1999.

Art. 13. Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

JOSÉ SARNEY FILHO
Presidente do CONAMA

JOSÉ CARLOS CARVALHO
Secretário-Executivo

5.2. Anexo II – Resolução Conama 301/02

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA
 RESOLUÇÃO N o 301, DE 21 DE MARÇO DE 2002

Altera dispositivos da Resolução n o 258, de 26 de agosto de 1999, que dispõe sobre Pneumáticos.

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, no uso das competências que lhe confere a Lei n o 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto n o 99.274, de 6 de junho de 1990 e suas alterações, e tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, e

Considerando a necessidade de se alterar a Resolução CONAMA n o 258, de 26 de agosto de 1999, visando sua melhor aplicação, resolve:

Art. 1 o Alterar e incluir os seguintes Considerandos à Resolução CONAMA n o 258, de 26 de agosto de 1999, que passam vigorar com a seguinte redação:

".....

Considerando que os pneumáticos novos, depois de usados, podem ser utilizados em processos de reciclagem;

.....

Considerando que a importação de pneumáticos usados é proibida pelas Resoluções CONAMA n os 23, de 12 de dezembro de 1996 e 235, de 7 de janeiro de 1998;

Considerando que se faz necessário o controle do passivo ambiental gerado pelos pneumáticos usados oriundos de veículos automotores e bicicletas;

Considerando que de acordo com a legislação vigente, compete ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis-IBAMA, o controle, a fiscalização e a edição dos atos normativos pertinentes à Resolução; resolve:" (NR)

Art. 2 o Alterar os arts. 1 o , 2 o , 3 o , 11 e 12 da Resolução CONAMA n o 258, de 1999, e acrescentar o art. 12-A, que passam a vigorar com a seguinte redação.

"Art.1 o As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos para uso em veículos automotores e bicicletas ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas.

....." (NR)

"Art. 2 o

I - pneu ou pneumático: todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço utilizados para rodagem em veículos automotores e bicicletas;

.....

IV - pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional, conforme código 4012.20 da Tarifa Externa Comum-TEC." (NR).

"Art.3 o Os prazos e quantidades para coleta e destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneumáticos inservíveis resultantes de uso em veículos automotores e bicicletas de que trata esta Resolução, são os seguintes:

I - a partir de 1 o de janeiro de 2002: para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus importados, novos ou reformados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

II -a partir de 1 o de janeiro de 2003: para cada dois pneus novos fabricados no País ou pneus importados, novos ou reformados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;" (NR)

.....

"Art. 11. Os distribuidores, os revendedores, os reformadores. os consertadores, e os consumidores finais de pneus, em articulação com os fabricantes, importadores e Poder Público, deverão colaborar na adoção de procedimentos, visando implementar a coleta dos pneus inservíveis existentes no País." (NR)

"Art. 12. O não cumprimento do disposto nesta Resolução implicará nas sanções estabelecidas na Lei n o 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e no Decreto n o 3.179, de 21 de setembro de 1999." (NR)

"Art. 12-A. As regras desta Resolução aplicar-se-ão também aos pneus usados, de qualquer natureza, que ingressarem em território nacional por força de decisão judicial." (NR)

.....

Art. 3 o Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

MARINA SILVA
Presidente do Conselho

5.3. Anexo III – Sumário de Emissões de Substâncias Orgânicas em Queima a Céu Aberto

Tabela A1: Resultados de simulação de queima de pneus em laboratório, emissões de substâncias voláteis, apresentado em relatório da EPA [5].

Fatores de Emissão em mg/kg					
Componente	Pedaço	Inteiro	Componente	Pedaço	Inteiro
Benzaldeído	299	330	Isocyanobenzeno	348	290
Benzeno	2.156	2.205	Limoneno	27,5	893
Benzodiazina	13,7	17,4	Metil benzeno	1.606	1.129
Benzofurano	25,1	ND	Metil ciclohexano	21,1	40,1
Benzotiofeno	26,3	14,7	Metil hexadieno	71,3	127
1,3-Butadieno	308	160	Metil indeno	316	140
Ciclopentadieno	48,6	ND	Metil naftaleno	312	197
Dihidroindeno	40,6	42,8	Metil tiofeno	5,5	12,6
Dimetil benzeno	779	1.078	Metil etenil benzeno	55,7	76,6
Dimetil hexadieno	28,8	90,9	Metil metiletetil benzeno	98,0	683
Dimetil metil propil benzeno	ND	14,9	Metil metiletetil benzeno	111	283
Dimetil dihidroindeno	22,0	17,7	Metil metiletetil ciclohexano	ND	170
Etenil benzeno	941	611	Metil propil benzeno	ND	41,6
Etenil ciclohexano	26,2	107,6	Metil indeno	48,5	34,4
Etenil dimetil benzeno	7,2	23,7	Metiletetil benzeno	135	169
Etenil metil benzeno	14,1	19,5	Naftaleno	1.130	824
Etenil dimetil ciclohexano	ND	350	Pentadieno	164	1.163
Etenil metil benzeno	221	40,9	Fenol	0,5	14,3
Etil benzeno	460	295	Propil benzeno	72,4	84,2
Etil metil benzeno	334	475	Tetrametil benzeno	ND	256
Etil benzeno	190	131	Triofeno	54,6	27,9
Etil metil benzeno	530	258	Triclorofluorometano	57,6	ND
Heptadieno	25,4	51,4	Trimetil benzeno	46,9	74,9
Total:				11.182	13.068

ND – não detectado

Tabela A2: Resultados de simulação de queima de pneus em laboratório, emissões de substâncias semi-voláteis, apresentado em relatório da EPA [5].

Fatores de Emissão em mg/kg					
Componente	Pedaço	Inteiro	Componente	Pedaço	Inteiro
1-Metil naftaleno	330	227	Isociano-naftaleno	9,4	ND
1,1' Bifenil metil	11,1	ND	Limoneno	56,1	2.345
1H Fluoreno	210	308	Metil benzaldeido	ND	86,6
2-Metil naftaleno	350	429	Metil benzeno	1.212	1.390
Acetadieno	633	531	Metil indeno	111	400
Benzaldeido	244	333	Metil metilel benzeno	48,3	229
Benzaltiazola	ND	173	Naftaleno	1.697	1.130
Benz(b)tiofeno	44,2	ND	Fenantereno	183	187
Bifenil	209	330	Fenol	365	700
Cianobenzeno	223	516	Propenil naftaleno	23	ND
Dimetil benzeno	305	935	Propenil metil benzeno	ND	523
Dimetil naftaleno	41,0	178	Propil benzeno	ND	219
Etil benzeno	205	337	Estireno	659	645
Etil dimetil benzeno	ND	272	Tetrametil benzeno	ND	91,9
Etinil benzeno	275	187	Trimetil benzeno	209	751
Hexahidro-azepiona	75,1	748	Trimetil naftaleno	ND	315
Indeno	503	339			
Total:				8.369	16.293

ND – não detectado

Tabela A3: Resultados de simulação de queima de pneus em laboratório, emissões totais de substâncias orgânicas, apresentado em relatório da EPA [5].

Fatores de Emissão em mg/kg		
Componentes orgânicos	Pedaço	Inteiro
Voláteis	11.182	13.068
Semi-Voláteis	9.792	31.686
Particulado	11.223	14.888
Total:	32.197	59.642

Tabela A4: Resultados de simulação de queima de pneus em laboratório, emissões de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares, apresentado em relatório da EPA [5].

Fatores de Emissão em mg/kg					
Componente	Pedaço	Inteiro	Componente	Pedaço	Inteiro
Naftaleno	815,9	486,0	Benz(a)antraceno	82,2	102,4
Acenaftileno	861,3	561,8	Criseno	70,8	91,6
Acenafteno	290,3	2.445	Benzo(b)fluoranteno	69,4	88,4
Fluoreno	260,5	186,8	Benzo(k)fluoranteno	74,3	99,4
Fenantereno	237,5	252,5	Benzo(a)pireno	84,8	113,9
Antraceno	56,3	49,6	Dibenz(a,h)antraceno	1,1	ND
Fluoranteno	338,7	458,0	Benzo(g,h,i)perileno	66,0	159,4
Pireno	33,8	151,7	Indeno(1,2,3-cd)pireno	51,6	85,5
Total:				3.394	5.332

ND – não detectado

5.4. Anexo IV – Planilha de Cálculo – Balanços Térmicos e Mássicos das Câmaras de Gaseificação e Combustão

Câmara Primária (gaseificação) $\varphi = 45\%$								
	Ar de combustão (primário)			Entrada	Saída			
	% massa	kg/h	kmol/h		kg/h	kg/h	kW	
H2O	0,1	6,44	0,36	pneu	582,0	gás	6895,6	2249,0
CO2						óleo	29,1	10,3
O2	23,3	1500,7	46,9			partículas	98,9	33,8
N2	76,6	4940,9	176,3			Total	7023,7	2293,2
Outros								
Total	100,0	6448,1	13471,8					
Temperatura	270,0 °C					979,6 °C		
Q ponto	404,3 kW					2293,2 kW		
Densidade	0,622 kg/m3							
Balanço térmico								
	Entradas	Saídas				Consumo	2293,2 kW	
	Pneu	Gás	Óleo	Partículas		Q ponto	2293,2 kW	
PCI	35547,0	1394,5	40400,0	31300,0			0,00 %	
m ponto	582,0	6895,6	29,1	98,9	kJ/kg			
E comb.	5746,8	2671,1	326,6	860,2	kg/h			
					kW			
Câmara Secundária $\varphi = 130\%$								
	Ar de combustão (secundário)			Entrada	Saída			
	% massa	kg/h	kmol/h		% massa	kg/h	kmol/h	
H2O	0,1	2,2	0,12		4,4	405,5	22,5	
CO2					19,5	1799,6	40,9	
O2	23,3	515,1	16,1		1,3	118,9	3,7	
N2	76,6	1695,8	60,5		74,7	6896,7	246,1	
Outros					0,2	16,1		
Total	100,0	2213,1			100,0	9236,8		
Temperatura	25,0 °C				979,6 °C	2136,8 °C		
Q ponto	0 kW				2293,2 kW	6151,1 kW		
h comb.					3857,9 kW			
Total					6151,1 kW	6151,1 kW 0,00%		
Entradas		Saídas		Economizador				
Q ponto	kW	Q ponto	kW	Q ponto	Gases	Ar prim.		
h comb.				Delta T	404,3	404,3		
Total	kW	Total	kW	T saída	93,0	245,0		
					214,0	270,0		
						°C		

5.5. Anexo V – Planilha de Dados – Características dos Combustíveis

Vermelho = entradas; Preto = números calculados pela planilha

Combustíveis															
	Pneu inteiro			Gás			Óleo			Particulado			Produto de gaseificação (Ar+Gás+Particulado+Óleo)		
	14,40 t/dia			212,59 kmol/h											
	15,00 % de Fe														
m ponto	510,0 kg/h			6042,6 kg/h			25,5 kg/h			86,7 kg/h			6154,8 kg/h		
m comb/m pneu	1,00 kg/kg pneu			11,85 kg/kg pneu			0,050 kg/kg pneu			0,170 kg/kg pneu			12,07 kg/kg pneu		
Fração (*)	100 %			78 %			5 %			17 %			100 %		
PCI	35547,0 kJ/kg			1394,5 kJ/kg			40400,0 kJ/kg			31300,0 kJ/kg			1977,4 kJ/kg		
Cp médio	1,37 kJ/kgK			1,23 kJ/kgK			1,34 kJ/kgK			1,29 kJ/kgK			1,31 kJ/kgK		
	% massa	kg/h	kmol/h	% massa	kg/h	kmol/h	% massa	kg/h	kmol/h	% massa	kg/h	kmol/h	% massa	kg/h	kmol/h
C	84,4	430,4	35,8	5,6	338,5	28,2	84,9	21,6	1,8	81,0	70,2	5,8	7,0	430,3	35,8
H	7,8	39,8	39,4	0,6	36,2	35,9	10,5	2,7	2,7	0,8	0,7	0,7	0,6	39,6	39,2
O	2,9	14,8	0,9	18,4	1110,8	69,4	0,0	0,0	0,0	2,8	2,4	0,2	18,1	1113,2	69,6
N	0,2	1,0	0,1	75,4	4557,1	325,3	0,3	0,1	0,0	0,4	0,3	0,0	74,0	4557,5	325,3
S	1,3	6,6	0,2				0,0	0,0	0,0	1,2	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0
Outros	3,4	17,3					4,3	1,1		13,8	12,0		0,2	13,1	
Total	100,0	510,0		100,0	6042,6		100,0	25,5		100,0	86,7		100,0	6154,8	
O2 esteq.		2922,4	91,3		1267,0	39,6		157,8	4,9		384,9	12,0		347,2	10,8
N2 esteq.		9621,5	343,4		4171,5	148,9		519,5	18,5		1267,1	45,2		5958,1	212,6
Ar esteq.		12543,9			5438,6			677,3			1652,0			7767,8	

(*) - Fração em massa. Base em pneus fragmentados, não inclui fração de Fe.