

# ESTUDO DE VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE PNEUS COMO COMBUSTÍVEL NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**Henrique Marchiori**

E-mail: henrique.marchiori@dynamismecanica.com.br

***Resumo.** O presente estudo trata das análises de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento de pneus descartados como combustível em geração de energia elétrica. O desenvolvimento desta tecnologia visa principalmente reduzir os impactos causados pelos acúmulos de pneus descartados que carecem de destino adequado. Os parâmetros do processo de combustão foram aproximados através de resultados experimentais, modelo cinético e de transferência de calor. Associados a dados provenientes de casos de incineração de resíduos e exigências ambientais, o trabalho resultou em características conceituais de um equipamento. Verificou-se a necessidade de grandes investimentos em sistemas de tratamento e análise de gases efluentes. A proposta mostrou-se tecnicamente factível, porém, de alto custo, requerendo investimentos governamentais ou da própria indústria de pneus.*

***Palavras chave:** pneus, gaseificação, incineração de resíduos.*

## 1. Introdução

Desde a década de 1970 estudam-se destinos adequados para pneus descartados. Até então, este material era disposto em aterros ou pilhas a céu aberto. As normas e legislações a respeito eram incipientes.

Na medida em que a frota mundial de veículos cresceu, agravaram-se os problemas com relação aos depósitos. 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) (1997), a queima de pneus a céu aberto emite quase 6% da massa de combustível entre partículas sólidas e voláteis orgânicos, muitos altamente tóxicos e carcinogênicos.

Entre as soluções desenvolvidas passou-se a consumi-los como combustível em processos industriais, geração de energia elétrica e plantas de cogeração.

No Brasil, dentre as aplicações como combustível, destacam-se os fornos de cimento. Os fornos de alta temperatura envolvidos permitem incinerar diversos tipos de resíduos potencialmente poluentes. O processo de produção de clínquer seqüestra partículas e elementos potencialmente nocivos, como o enxofre, introduzindo-os no próprio produto.

Mais comumente na Europa e Estados Unidos, pneus também são utilizados como combustível secundário em caldeiras de recuperação em ciclos combinados de geração termelétrica e caldeiras a carvão. No Brasil, além da indústria de cimento, há uma planta de gaseificação de xisto betuminoso utilizando pneus como matéria prima secundária. Mas, a produção de pneus ainda é muito superior à quantidade eliminada.

Neste contexto, torna-se interessante avaliar a possibilidade de utilizar os pneus descartados como fonte de energia, seja para a geração de energia elétrica ou para geração de gases quentes, considerando o desenvolvimento de tecnologias especializadas na combustão de pneus com controle legalmente satisfatório de emissões.

## 2. Destino dos Pneumáticos Inservíveis

Em Wiesbaden, Alemanha, 1978, se deu a primeira iniciativa com relação à queima de pneus, utilizados como combustível secundário em fornos 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 incidente.

Nos Estados Unidos, em 2005, aproximadamente 85% dos pneus descartados foram legalmente destinados. Atualmente são praticadas diversas técnicas para mitigação do problema de acúmulo de pneus, além do uso como insumo energético, que consome aproximadamente metade da produção.

Estimativas quanto ao número de pneus inservíveis gerados anualmente no Brasil estão entre 17 e 20 milhões, sendo seis milhões no estado de São Paulo. Já se acumulam no país em torno de 100 milhões de unidades em depósitos irregulares. Um levantamento feito por Güenther (2006) reuniu dados das 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 (2006), Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, 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 no país 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 reconicionados: 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 – Compromisso Empresarial para Reciclagem (2007), 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 disposto em aterros.

As iniciativas mais concretas no Brasil ocorrem em parceria com a indústria de cimento. Não sendo necessárias grandes adaptações nos equipamentos, no mínimo, 20% em valor energético do combustível pode ser substituído por pneus.

Como agravantes do problema de descarte dos pneumáticos inservíveis, Cimino (2004) destaca os seguintes fatores:

- 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 e conseqüentes emissões massivas de particulados e gases tóxicos na atmosférica, além de óleos que acabam por contaminar o solo e as águas subterrâneas.
- O formato dos pneus tem a característica de acumular água, somada à incidência de luz solar, cria um ambiente propício à reprodução de mosquitos vetores associados a patologias como a dengue e febre amarela.

### 3. Legislação Ambiental

Reconhecendo-se a carência de destinações adequadas, em 1999, instituiu-se a primeira lei federal com relação ao descarte de pneus. A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 258/99, reeditada na Resolução CONAMA nº 301/02 estabelece os responsáveis com relação ao recolhimento e eliminação dos pneus descartados. O CONAMA é um órgão federal com competência para editar normas, conceder licenças, definir parâmetros e aplicar recursos dirigidos ao meio ambiente.

Estas 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. Composição Química

Segundo Goulart et al. (1999) apud Williams et al. [7] e o relatório da Califórnia Integrated Waste Management Board (1995), os pneus são compostos principalmente pelas seguintes substâncias: borracha estireno-butadieno (SBR); borracha natural (NR); borracha polibutadieno (BR); negro de fumo; óleos; Enxofre; aceleradores químicos; ácido esteárico; óxido de zinco; fibras sintéticas; açós.

Para o presente estudo foram adotadas as composições médias elementares indicadas na Fig. (1), condizentes com dados publicados pela EPA (1997). 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 (1995) são significativamente diferentes e os dados relativos à amostra de pneus picados diferem dos dados de pneus inteiros publicados no mesmo documento.

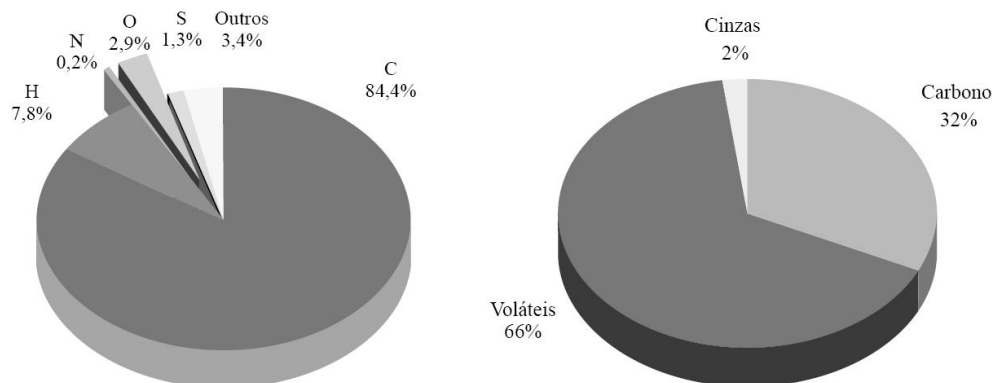


Figura 1 - Análise elementar e imediata de fragmentos de pneu, retirado de Goulart et al. (1999).

## 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.

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 (2005), a planta opera com 12% da carga (48 toneladas) por dificuldade de coleta de matéria prima.

## 6. Processos de Pirólise e Gaseificação

O maior entrave técnico para utilização de pneus como combustível se deve à dificuldade encontrada em satisfazer condições adequadas à reação de combustão completa. 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.

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, antrácenos, dioxinas, bifenóis policlorinados e metais pesados, todas altamente carcinogênicas. Dados apresentados pelo relatório da EPA (1997), 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.

Para contornar o problema de emissões, o presente projeto considera processos decomposição térmica que consistem em elevar a temperatura do material até o ponto em que haja volatilização e ocorra fragmentação das cadeias orgânicas maiores. Como resultado obtém-se produtos gasosos, líquidos e particulados, mais adequados à combustão controlada que se dá em outra etapa.

Usualmente classifica-se este tipo de processo de acordo com o fator de excesso de ar ( $\phi$ ). Havendo oxidante suficiente para a reação completa ou  $\phi$  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. Nos processos de gaseificação ocorre oxidação parcial, com  $\phi$  entre 0 e 1,0 e não há demanda por fonte externa de calor. Alguns autores consideram também a liquefação que equivale à gaseificação, mas visa à máxima produção de óleo.

A composição dos produtos varia de acordo com diversos parâmetros. Como base, pode-se observar o trabalho de Goulart et al. [9] que realizaram ensaios com fator de excesso de ar de 40% e obtiveram as frações médias em massa de 73% de gases, 7% de óleos e 20% de cinzas. A mistura de gases possui poder calorífico inferior (PCI) de 1.394 KJ/Kg e contém as frações mássicas seguintes: 75% de  $N_2$ ; 3% de  $CH_4$ ; 9% de  $CO_2$ ; 3% de  $CO$ ; 3% de  $H_2$ ; e 7%  $O_2$ . A mistura de óleos possui PCI de 41.000 KJ/Kg e tem a composição elementar seguinte: H - 10,5%; N - 0,3 %; C - 4,3 %; Outros - 84,9 %.

## 7. Alternativas de Projeto

Com base nos levantamentos de tecnologias, foram concebidas três soluções alternativas, dentre as quais se selecionou uma. O projeto tem por base a capacidade para 5.000 toneladas por ano, equivalente a um terço da produção da região da grande São Paulo. Pelas primeiras estimativas, este valor deve representar uma geração líquida de aproximadamente 1400 MW, assumindo-a proporcional à capacidade e às potências das plantas existentes.

A primeira alternativa baseou-se em atuais termelétricas a carvão de gaseificação integrada a ciclo combinado (IGCC). Com esta configuração é possível alimentar turbinas a gás através dos produtos de gaseificação do combustível e aproveitar resíduos em caldeiras de recuperação.

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 baixas adaptadas aos 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 o ciclo combinado menos adequado a escalas pequenas de produção. Entre as três alternativas sugeridas, esta provavelmente teria maior rendimento térmico, porém maior custo.

Tratando-se de uma atividade nova no país, 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 à geração de energia elétrica, mas também a eliminação de resíduos a custos de implantação viáveis.

A segunda opção contempla um ciclo motor diesel alimentado por produtos de gaseificação ou pirólise. Comparada aos outros sistemas, apesar de ser mais compacta, a combustão interna possui maior risco de queima incompleta. Como dito anteriormente, entre os componentes do óleo, há substâncias perigosas que devem ser totalmente decompostas na combustão.

Entre o uso de máquinas de combustão interna e o uso de um 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 susceptível à presença de enxofre e a possibilidade de emissão de substâncias orgânicas tóxicas.

A terceira concepção, mais adequada à proposta, se constitui de um ciclo a vapor alimentado por gases quentes provenientes da combustão de pneus em dois estágios. No primeiro estágio ocorre gaseificação do material, de tal forma que parte das cinzas e o aço, sólidos, são separados do restante. Os demais produtos são incinerados em outro estágio, numa câmara independente onde ocorre combustão completa com longo tempo de permanência e alta temperatura, reduzindo a ocorrência de substâncias orgânicas não queimadas.

## 8. 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 (Fig. 8.1), de acordo com Fugimura (2004). Utiliza-se gaseificador de leito fluidizado devido à granulometria de entrada do combustível, que exige elevado tempo de permanência.

Teng et al. (1997) 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 (2004), Basu (2006) e Teng et al. (1997)).

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 (2006) 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. (2006) e Chen et al. (2001)).

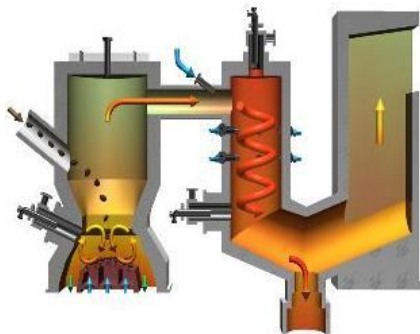


Figura 8.1.: Modelo esquemático de equipamento incineração por gaseificação seguida de combustão, concebido pela EBARA Company. Retirado de Fugimura (2004).

## 9. Modelo Físico

### 9.1. Ciclo a Vapor - Balanço Térmico

O modelo contempla a análise termodinâmica (balanço) dos dois estágios do equipamento (Tab. 9.1, Tab. 9.2 e Fig. 9.1).

A estimativa das composições mássicas dos produtos e reagentes de gaseificação e combustão (Anexo V) levam em conta os resultados de Goulart et al. (1999) 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<sub>2</sub> e todo hidrogênio na forma de H<sub>2</sub>O. 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 9.1, 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 trocadores de calor, convencionais, foram adotadas efetividades

típicas, de 81% para o gerador de vapor, conforme Babcock (2004) e 35% para o condensador. 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%.

O rendimento térmico calculado do ciclo é de 23,6%. Ciclos semelhantes freqüentemente têm rendimentos em torno de 30,0%, esta diferença se deve principalmente à eficácia reduzida do gerador de vapor devido à combustão, que ocorre externamente ao mesmo. Ou seja, não havendo transferência de calor através da radiação da chama diretamente para as paredes de água, seria necessária uma área maior de troca de calor para se alcançar maiores efetividades o que elevaria o custo do equipamento.

i. Gerador de Vapor

Potência útil: 4.129,0 kW  
 Efetividade: 81,0 %  
 Fluxo de água: 5.970,1 Kg/h

ii. Turbina a Vapor

Fabricante: General Electric  
 Classe: C  
 Potência útil: 1.367,4 kW  
 Eficiência ise.: 88,0 %

iii. Bomba

Potência: 15,4 kW  
 Eficiência ise.: 88,0 %  
 v 0,00101 m<sup>3</sup>/kg

Tabela 9.1: Vazões mássicas, fluxos de entalpia e temperatura de ar e gases quentes, pontos conforme figura 10.1.

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

Tabela 9.2: 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

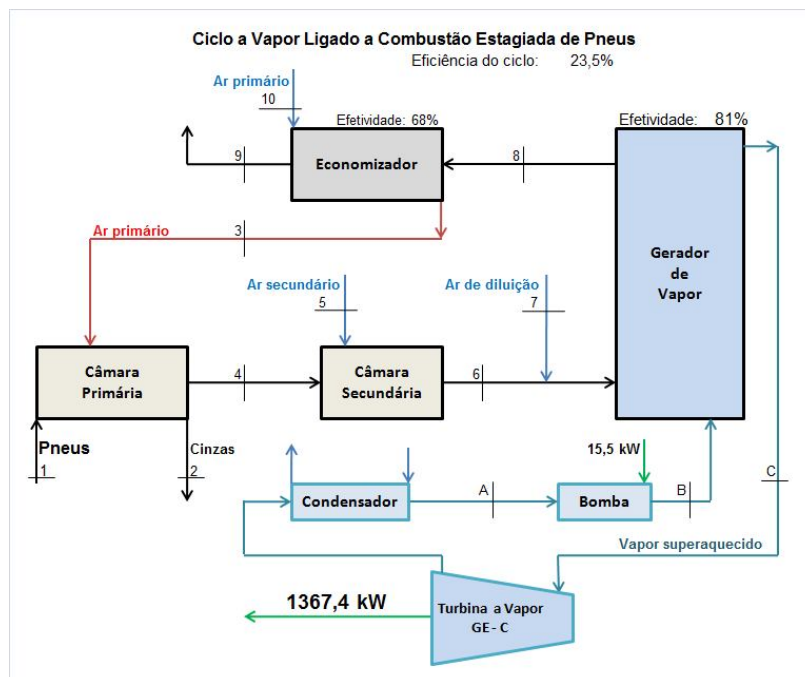


Figura 9.1.: Ciclo a Vapor Associado ao Sistema de Combustão Estagiada de Pneus.

## 9.2. Gaseificação em Leito Fluidizado.

O dimensionamento da câmara primária foi feito através de modelos encontrados na literatura, de transporte de partículas, transferência de calor e cinética de gaseificação. O objetivo deste modelo é dimensionar a câmara e analisar condições viáveis de funcionamento.

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 (2004), 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 (2006)), conforme a equação abaixo:

$$F_g = F_E + F_D$$

Onde:

A força gravitacional é:  $F_g = m_p g$  ;

A força de empuxo é:  $F_E = \frac{m_p \rho_g g}{\rho_p}$  ;

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

Os índices  $g$  e  $p$  correspondem à partícula e ao gás respectivamente;  $u$  é a velocidade;  $\rho$  é a densidade; e  $Cd$  o coeficiente de arrasto, que equivale ao valor constante de 0,44 em escoamento turbulento com  $500 < Re < 2 \times 10^5$ , Oka (2004).

O diâmetro equivalente ( $dp$ ) da partícula corresponde à média geométrica entre o maior e o menor diâmetro da partícula, conforme sugere Oka (2004). 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 antes do início da reação é de 33,3 m/s. Conforme ocorre a reação, as partículas perdem massa e tornam-se mais suscetíveis ao arrasto através dos gases o que faz necessária uma câmara de área de seção transversal crescente ao longo do eixo vertical.

Para o dimensionamento da região de leito fluidizado é necessário calcular a densidade aparente do leito e o tempo de permanência das partículas que, por sua vez, depende da taxa de variação de massa.

Juma et al. (2006) 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.

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

O fator pré-exponencial ( $A=1,02 \times 10^7$ ) e a energia de ativação ( $E=165 \text{ kJ/mol}$ ) 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:

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

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

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

A combinação destes modelos permite integrar a variação da massa das partículas de combustível (Fig. 9.2) e determinar a temperatura em função do tempo (Fig. 9.3). Este cálculo foi realizado numericamente, sendo que em cada passo são calculados: os números de Reynolds, de Nusselt, coeficiente de transferência de calor por convecção, taxa de transferência calor e de massa e diâmetro da partícula.

Estes resultados corroboram com dados experimentais em dois aspectos: (1) a taxa de transferência de calor fica entre 412 e 505 W/m<sup>2</sup>K o que corresponde às taxas típicas, de 200 a 500 W/m<sup>2</sup>K, para câmaras de leito fluidizado (Basu (2006) e Oka (2004)); e (2) a gaseificação se inicia em temperaturas em torno de 400 °C, próxima ao resultado de Chen (2001) (~330°C) e Juma (2006) (~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 de combustível sólido necessária à produção nominal é de 32,6 kg. Com  $\varepsilon = 0,7$  e a densidade aparente do leito é de 402 kg/m<sup>3</sup>. É necessária ainda uma região de maior diâmetro (menor velocidade) a jusante para o desacoplamento das partículas menores.

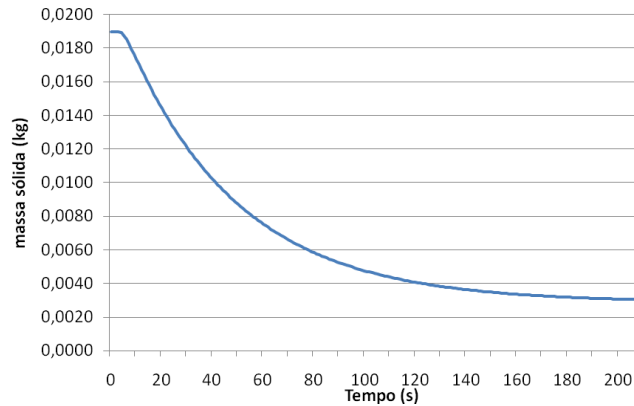


Figura 9.2.: Massa de partícula sólida de 0,019 kg de pneu em função do tempo.

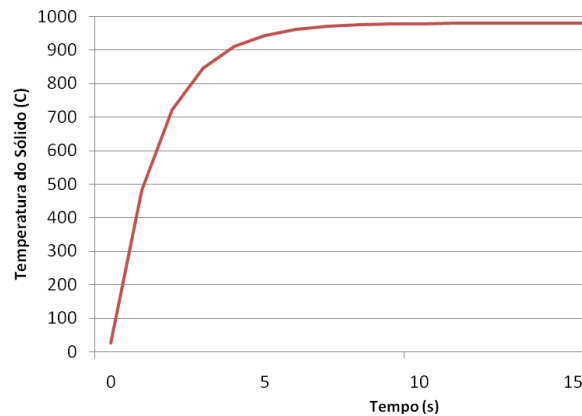


Figura 9.3.: Curva de aquecimento de partícula de pneu.

## 10. Análise Econômica

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.

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 (25% 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 (7,3 anos). Em geral, investimentos com retorno de mais de cinco anos não são praticados pela iniciativa privada. Com o atual preço da energia elétrica, a planta de geração de energia elétrica dependeria de subsídios governamentais ou auxílio da indústria de pneumáticos.



Tabela 11.1: Orçamentos estimativos de equipamentos e serviços

Gaseificador de leito fluidizado; 600 kg/h – Termoquip	
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
<b>Subtotal</b>	<b>R\$ 949.000</b>
Câmara secundária; 7,0 MW – H Bremer	
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
<b>Subtotal</b>	<b>R\$ 477.000</b>
Gerador de vapor; 6.000 kg/h de vapor – H Bremer	
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
<b>Subtotal</b>	<b>R\$ 1.154.000</b>
Turbogerador; 1,4 MWe – General Electric	
Turbina	R\$ 430.000
Gerador / Painéis	R\$ 252.000
Condensador	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
<b>Subtotal</b>	<b>R\$ 1.195.000</b>
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
<b>Subtotal</b>	<b>R\$ 8.500.000</b>
Totais	
Gaseificador de leito fluidizado	R\$ 949.000
Câmara de combustão (secundária)	R\$ 477.000
Gerador de vapor	R\$ 1.154.000
Turbogerador	R\$ 1.195.000
Precipitador eletrostático	R\$ 5.000.000
Outros	R\$ 3.500.000
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>R\$ 12.275.000</b>

## 11. 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 impõem.

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 indica que o financiamento através da iniciativa privada é pouco plausível devido ao tempo de retorno do investimento de aproximadamente 87 meses.

Os resultados de escala de laboratório 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 kWe, 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 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 que foi ser dividido em uma região de reação substequiométrica e outra com excesso de ar.

## 12. Referências

- ALBRIGHT, Lyle F., CRYNES, Billy L., CORCORAM, William H., 1983, *Pyrolysis, Theory and Industrial Practice*, New York, Academic Press.
- ANIP, 2006 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.
- BABCOCK & WILCOX, 2004, *Steam - Its Generation and Use*. 40th edition.
- BASU, Prabir, 2006, *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. CRC – Taylor and Francis.
- CALIFORNIA INTEGRATED WASTE MANAGEMENT BOARD, 1995, *Environmental Factors of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction*.
- CEMPRE, 2007, *Compromisso Empresarial para Reciclagem*, <[www.cempre.com.br](http://www.cempre.com.br)>, acessado em junho de 2007.
- CHEN, J.H.; CHEN, K.S.; TONG, L.Y. – On the Pyrolysis of Scrap Automotive Tires. *Journal of Hazardous Materials*, 43 – 55, 2001.
- CIMINO, Marly Alvarez, 2004, *Gerenciamento de Pneus Inservíveis: Análise Crítica de Procedimentos Operacionais e Tecnologias para Minimização, Adotadas no Território Nacional*.
- FUJIMURA H.; OSHITA T.; NARUSE, K. 2005, *Fluidized-Bed Gasification and Slugging Combustion System*. EBARA Corporation - Environmental Engineering Group Environmental Technology Development Center. Presented at the IT3 Conference, Philadelphia, USA.
- GENERAL ELECTRIC; <[www.gepower.com](http://www.gepower.com)>, consulta em novembro de 2007
- GOULART, Eduardo A., MARIOTONI, Carlos A., SÀNCHEZ, Caio G., 1999, *A Utilização da Gaseificação de Pneus Usados em Leito Fluidizado para a Produção de Energéticos. Polímeros: Ciência e Tecnologia*.
- GÜNTHER, Wanda Maria Risso, 2002, *Descarte de Pneus Inservíveis: um Problema na Grande São Paulo – XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México*.
- H BREMER, H Bremer & Filhos Ltda. <[www.bremer.com.br](http://www.bremer.com.br)>, consulta em novembro de 2007
- HIGMAN, Christopher, BURGT, Maarteen van der, 2007, *Gasification*, Gulf Professional Imprint, Elsevier.
- JUMA, M., 2006, *Pyrolysis and Combustion of Scrap Tire*, *Petroleum & Coal* 48 (1), 15-26.
- 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.
- OKA, Simeon N., 2004, *Fluidized Bed Combustion*. Marcel Dekker Inc. New York.
- PESĚK, L., 2006, *Thermo-Mechanical Properties of Compressed Rubber Block*, Institute of Thermomechanics ASCR, Prague, Czech Republic. 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June 18-21, 2007.
- PETROBRAS, 2005, *Informações sobre o Processo Petrosix*, disponível em <[www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br)>, em 25/05/2007.
- RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2006, *Scrap Tire Markets in United States, 2006*
- TENG, Hsisheng; CHYANG, Chien-Song; SHANG, Sheng-Hui; HO, Jui-An, 1997, *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.
- TERMOQUIP, Termoquip Engenharia Alternativa Ltda. <[www.termoquip.com.br](http://www.termoquip.com.br)>, consulta em novembro de 2007
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997, *Air Emissions from Scrap Tire Combustion*.
- VOTORANTIM CIMENTOS, 2007, *Responsabilidade Social e Ambiental*, disponível em <[www.votorantim-cimentos.com.br](http://www.votorantim-cimentos.com.br)>, em 3/07/2007.

## VIABILITY ANALYSIS OF POWER GENERATION FROM WASTE TIRES

Henrique Marchiori

E-mail: [henrique.marchiori@dynamismecanica.com.br](mailto:henrique.marchiori@dynamismecanica.com.br)

**Abstract.** This paper analyzes the technical and economical viability for waste tires combustion in power generation. The investigation main focus is the search for ways to prevent environmental risks from increasing tires stockpiles. The proposed power plant thermodynamics was analyzed. Experimental data, kinetic model and heat transfer model were used to simulate the combustion conditions. The equipment guide lines resulted from previews waste incineration data, legal requirements and current research. Despite of the technical feasibility, cost analysis indicates the need of large amount of investment in exhaust gas treatment and pollution control systems. The electric power generation project accomplishment depends on governmental or tire industry sources.

**Key Words:** *tire, gasification, waste to energy.*