

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá

Guaratinguetá
2011

PAULO TASSO DINIZ FILHO

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM GASEIFICADOR
DOWNDRAFT E DE FILTROS PARA LIMPEZA DE GÁS DE SÍNTESE

Trabalho de Graduação
apresentado ao Conselho de Curso
de Graduação em Engenharia de
Materiais da Faculdade de
Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, como parte dos
requisitos para obtenção do
diploma de Graduação em
Engenharia de Materiais.

Orientador: Professor Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá
2011

Diniz Filho, Paulo Tasso

D585a Análise técnico-econômica de um gaseificador Downdraft e de filtros para
limpeza de gás de síntese / Paulo Tasso Diniz Filho. – Guaratinguetá : [s.n], 2011

83 f. : il.

Bibliografia : f. 81

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

1. Biomassa 2. Energia elétrica e calor - Cogeração I. Título.

CDU 620.91



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM GASEIFICADOR
DOWNDRAFT E DE FILTROS PARA LIMPEZA DE GÁS DE SÍNTESE

PAULO TASSO DINIZ FILHO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA
DE **GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS




Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Coordenador

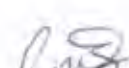
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA
Orientador/UNESP-FEG-GOSE



Prof. Dr. WENDÉLL DE QUEIRÓZ LAMAS
UNESP/FEG-GOSE



Prof. Msc. RÓNNEY ARISMEL MANCEBO BOLÓY
UNESP/FEG-GOSE

DADOS CURRICULARES**PAULO TASSO DINIZ FILHO**

| | |
|------------|---|
| NASCIMENTO | 03.06.1986 – SÃO PAULO / SP |
| FILIAÇÃO | Paulo Tasso Diniz Eliana Maria Kaltner Curvo |
| 2007/2011 | Curso de Graduação UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho |

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família, pelo apoio durante todos estes anos em que tive de residir em Guaratinguetá. Apesar da distância nunca deixaram de acreditar nas minhas capacidades. Agradeço aos meus colegas da república Móikana, pelos ótimos momentos que pudemos conviver juntos. Com certeza terei saudades.

Agradeço a nossa empregada-mãe Marly, que sempre cuidou de nós como se fossemos seus filhos.

Agradeço ao Prof. Dr. José Luz Silveira, pela oportunidade de pesquisar e de fazer parte do Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos – GOSE, e ao Prof. Dr. Christian Coronado Rodriguez pela orientação, ajuda e incentivo no desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço a banca formada pelos professores Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas e Prof. Msc. Ronney Mancebo Boloy, pela disponibilidade em avaliar o meu trabalho.

“Na verdade, na verdade vos digo que se o grão de trigo, caindo na terra, não morrer, fica eles só, mas se morrer, dá muito fruto (Jô 12:24)”

DINIZ, P. T. F. **Análise técnico-econômica de um gaseificador Downdraft e de filtros para limpeza de gás de síntese.** 2011. 83 f. Tese (Trabalho de Conclusão de Graduação) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Os sistemas de gaseificação da biomassa têm sido utilizados por muito tempo e demonstram ser uma boa alternativa de geração frente aos problemas energéticos. Este tipo de instalação requer um simples manejo e manutenção que lhes confere uma alta disponibilidade. Em projeto de Biomassa, via Edital CTenerg 33/2006-1, financiado com recursos do Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT – Brasil, o Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos da FEG – UNESP construiu e testou 2 protótipos de gaseificadores. Esses são alimentados com 25 kg/h de madeira seca (cavacos), e com 50 Nm³/h de ar, para produzir gás numa vazão aproximada de 70 Nm³/h de madeira (syngas), a uma temperatura aproximadamente de 600 °C. Neste trabalho de graduação efetuaram-se estudos dos materiais empregados tanto no gaseificador como também no filtro de limpeza de gases de síntese. O sistema de condicionamento e limpeza do gás é de vital importância para garantir a vida útil do Motor de Combustão Interna. Neste caso o estudo dos diferentes filtros rígidos para sistemas de gaseificação de pequeno porte (propriedades, materiais empregados, características, tipos, etc) são muito relevantes para o seu uso no protótipo do campus da faculdade. Também foi realizada a análise técnico-econômica de um sistema de cogeração constituído da associação do gaseificador Downdraft estudado neste presente trabalho a um Motor de Combustão Interna, dois trocadores de calor, e um SRA (sistema de refrigeração por absorção). Foram calculadas as eficiências de geração de eletricidade, água quente e água fria. E por fim foi analisada a viabilidade econômica do projeto.

Palavras Chaves: gaseificador de madeira, análise técnica, filtros cerâmicos.

DINIZ, P. T. F. **Technical and economic analysis of a Downdraft gasifier and filters for cleaning of syngas**. 2011. 83 f. Tese (Trabalho de Conclusão de Graduação) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The biomass gasification systems have been used for a long time and prove to be a good alternative to the generation of energy problems. This type of management requires a simple installation and maintenance which gives them a high availability. In Biomass project via Call CTEnerg 33/2006-1, funded by the Ministry of Science and Technology - MCT - Brazil, the Group Energy Systems Optimization – GOSE - at FEG - UNESP built and tested two prototypes of gasifiers. These is fed with 25 kg / h of dry wood (chips), and 50 Nm³ / h of air to produce gas at a flow rate of approximately 70 Nm³ / h of wood (syngas) at a temperature approximately 600 ° C. In this work of graduation, studies were conducted on the materials used in both the gasifier as well as cleaning the filter synthesis gases. The system of gas cleaning and conditioning is vital to ensure the life of the Internal Combustion Engine. In this case the studies of different filters for small gasification systems (properties, materials used, characteristics, types, etc.) are very relevant to its use in the prototype of the college campus. Were also performed a technical and economic analysis of a cogeneration system that consists in the combination of the downdraft gasifier studied in this work, an internal combustion engine, two heat exchangers and a SRA (absorption system refrigerator). Were calculated the costs of electricity generation, hot water and cold water. Finally, we analyzed the economic feasibility of the project.

Keywords: gasification of wood, technical analysis, rigid gas filters, ceramic filters.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 Biomassa e Eletricidade | 17 |
| 1.2 Limpeza e filtragem do gás de biomassa | 19 |
| 1.3 Atual estado das tecnologias empregadas..... | 20 |
| 1.4 Parâmetros envolvidos na especificação dos filtros | 21 |
| 1.5 Filtragem do gás de síntese | 22 |
| 1.6 Alcatrão | 23 |
| 1.7 Eficiência dos sistemas | 24 |
| 2. SISTEMAS PARA REMOÇÃO DE ALCATRÃO (TAR) | 25 |
| 2.1 Adsorvedores de leito fixo | 25 |
| 2.2 Tratamento térmico para a remoção do alcatrão | 26 |
| 2.3 Tratamento catalítico para a remoção do alcatrão | 26 |
| 3. TIPOS DE FILTROS E TÉCNICAS DE FILTRAÇÃO | 27 |
| 3.1 Filtros do tipo manga | 27 |
| 3.2 Filtros multivelas | 29 |
| 3.3 Filtros cerâmicos do tipo cross-flow..... | 30 |
| 3.4 Precipitadores eletroestáticos | 33 |
| 3.5 Depuradores..... | 35 |
| 3.5.1 Depuradores via úmida combinados com Esp's..... | 35 |
| 4. ESTUDO DOS MATERIAIS E TÉCNICAS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE FILTROS..... | 37 |
| 4.1 Filtros cerâmicos..... | 37 |
| 4.2 Tipos de filtros para gases quentes | 39 |
| 4.3 Materiais fibrosos empregados em filtros..... | 39 |
| 4.4 Concepção do filtro desenvolvido | 40 |
| 5. BIOMASSA UTILIZADA NO PROTÓTIPO | 47 |
| 5.1 Tipos de partículas e moléculas produzidos na gaseificação | 51 |
| 5.2 Quantidade de partículas e moléculas produzidas por cada meio de gaseificação e filtração..... | 52 |
| 6. O GASEIFICADOR DOWNDRAFT..... | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 7. METODOLOGIA | 59 |
| 7.1 Análise Técnica | 60 |
| 7.1.1. Equação 1 – Eficiência de geração de energia elétrica (η_{GE}) | 62 |
| 7.1.2. Equação 2 – Eficiência de geração de água quente (η_{aq})..... | 62 |
| 7.1.3. Equação 3 – Eficiência de geração de água fria (η_{af}) | 62 |
| 7.1.4. Equação 4 – Eficiência global de geração (η_{Global})..... | 63 |
| 7.1.5. Equação 9 – Determinação da vazão de água quente gerada no TC1 ($maq1$) | 63 |
| 7.1.6. Equação 10 – Determinação da vazão de água quente gerada no TC2 ($maq2$) | 63 |
| 7.1.7. Equação 5 – Determinação da energia da água da jaqueta ($E_{AJaqueta}$)..... | 63 |
| 7.1.8. Equação 11 – Determinação da vazão da água da jaqueta ($m_{AJaqueta}$)..... | 64 |
| 7.1.9. Equação 6 – Determinação da energia dos gases de exaustão do motor ($E_{gás}$) | 64 |
| 7.1.10. Equação 12 – Determinação da vazão de gás de exaustão ($mgás$)..... | 64 |
| 7.1.10.1. – Cálculo do calor específico do gás de biomassa..... | 64 |
| 7.1.11. Equação 13 – Determinação da energia dos gases de exaustão dos gases no SRA ($E_{gás(SRA)}$)..... | 66 |
| 7.1.12. Equação 7 – Determinação do coeficiente de performance (COP)..... | 66 |
| 7.1.13. Equação 14 – Determinação da vazão de água fria (maf)..... | 66 |
| 7.2 Análise Econômica | 67 |
| 7.2.1. Equação 15 – Determinação do custo do combustível (C_{comb}) | 67 |
| 7.2.2. Estimativa do investimento no sistema de gaseificação (I_{gaseif}) | 68 |
| 7.2.3. Equação 16 – Determinação do custo da eletricidade gerada (C_{el}) | 70 |
| 7.2.4. Equação 17 – Determinação do custo da água quente gerado pelo TC1 – água/água ($Caq1$)..... | 71 |
| 7.2.5. Equação 18 – Determinação do custo da água quente gerado pelo TC2 – gás/água ($Caq2$) | 71 |
| 7.2.6. Equação 19 – Determinação do custo da água fria gerado pelo SRA (C_{af}).. | 72 |
| 8. RESULTADOS | 72 |
| 9. CONCLUSÕES..... | 80 |
| 10. BIBLIOGRAFIA | 81 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 – Adsorvedor de leito fixo para os compostos de alcatrão..... | 26 |
| FIGURA 2 – Dispositivo de filtro do tipo manga..... | 28 |
| FIGURA 3 – Filtros de vela Multi-camada. | 30 |
| FIGURA 4 – Esquema do processo de filtração tipo <i>cross-flow</i> | 32 |
| FIGURA 5 – Fluxo do gás e filtrado durante um processo <i>cross-flow</i> | 33 |
| FIGURA 6 – Filtro Cerâmico do tipo <i>cross-flow</i> | 34 |
| FIGURA 7 – Configuração esquemática de um filtro ESP | 35 |
| FIGURA 8 – Configuração de funcionamento de filtro baseado em precipitação eletrostática (ESP) | 36 |
| FIGURA 9 – <i>Wet Espes</i> | 38 |
| FIGURA 10 – Características de diversos meios de filtração. | 43 |
| FIGURA 11 – Filtro de manga de poliéster confeccionado | 47 |
| FIGURA 12 – Cavacos de madeira de eucalipto utilizados no protótipo | 48 |
| FIGURA 13 – Pesagem dos cavacos de madeira utilizados..... | 48 |
| FIGURA 14 – Cavacos de madeira de eucalipto doados pela empresa Nobrecel utilizados no projeto | 50 |
| FIGURA 15 – Cavacos de madeira e ao fundo a localização dos gaseificadores ... | 50 |
| FIGURA 16 – Reator <i>downdraft</i> | 54 |
| FIGURA 17 – Dimensionamento e funcionamento do gaseificador | 56 |
| FIGURA 18 – Parte inferior do gaseificador, detalhe..... | 57 |
| FIGURA 19 – Vista completa do gaseificador | 57 |
| FIGURA 20 e 21 – Detalhe para a parte interna do gaseificador e detalhe para a lã isolante a ser inserida no corpo do gaseificador..... | 58 |
| FIGURA 22 – Fluxo de gás de síntese produzido em função da biomassa processada em um gaseificador tipo <i>downdraft</i> com garganta.. | 60 |
| FIGURA 23 – Metodologia para a determinação de custo de equipamento..... | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 – Potência instalada no Brasil de termelétricas que utilizam biomassa | 18 |
| TABELA 2 – Partículas e de carregamento de alcatrão do gás de madeira com um gaseificador downdraft em comparação com os requisitos quando se utiliza o gás como combustível de um motor de combustão interna..... | 20 |
| TABELA 3 – Classificação das impurezas para cada processo de limpeza do gás. | 24 |
| TABELA 4 – A estabilidade da temperatura no meio filtrante típico | 28 |
| TABELA 5 – Dimensões, considerações técnicas, e materiais a serem utilizados na confecção de um filtro cerâmico para o uso na remoção de alcatrão e particulados no gás produzido pela biomassa | 41 |
| TABELA 6 – Classificação de filtros a ar segundo normal ABNT..... | 42 |
| TABELA 7 – Classificação de filtros a ar segundo normal internacional | 43 |
| TABELA 8 – Temperatura de trabalho e agentes químicos agressivos ao material da manga | 44 |
| TABELA 9 – Resistência da manga a diversos tipos de particulados | 45 |
| TABELA 10 – Custos parciais dos materiais selecionados para a confecção de filtros cerâmicos, por tonelada | 45 |
| TABELA 11 – Preços relativos para filtros tipo Duster, Manga, Cross Flow e precipitador eletrostático (U\$S). Padrão para sistemas relativos a 50M ³ /h de gás de síntese. Custo relativo por M ³ /h de gás | 46 |
| TABELA 12 – Poder calorífico superior e inferior, teor de água, massa específica aparente, densidade energética das biomassas, taxa de gaseificação e eficiência energética do sistema..... | 49 |
| TABELA 13 – Características do gás produzido no gaseificador | 53 |
| TABELA 14 – Redução do teor de alcatrão e particulados, utilizando diferentes sistemas de limpeza | 53 |
| TABELA 15 – Qualidade do gás requerida para diferentes aplicações tecnológicas..... | 54 |
| TABELA 16 – Custos parciais do sistema de gaseificação..... | 69 |

| | |
|---|----|
| TABELA 17 – Eficiências do sistema de gaseificação operando sobre a técnica da cogeração..... | 72 |
| TABELA 18 – Vazões mássicas envolvidas no sistema de gaseificação. | 73 |
| TABELA 19 – Energia gerada no sistema de gaseificação..... | 73 |
| TABELA 20 – Custo do combustível em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização..... | 74 |
| TABELA 21 – Custo da eletricidade em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização..... | 75 |
| TABELA 22 – Classificação Custo da geração de água quente pelo TC1 em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização. | 75 |
| TABELA 23 – Custo da geração de água quente pelo TC2 em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização..... | 76 |
| TABELA 24 – Custo da geração de água fria pelo SRA em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização..... | 76 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| GRÁFICO 1 – Gráfico do custo do sistema empregado vs eficiência na remoção de particulados..... | 46 |
| GRÁFICO 2 – Gráfico do custo do sistema empregado vs eficiência na remoção de alcatrão. | 46 |
| GRÁFICO 3 – Fluxo de ar produzido em função da biomassa processada em um gaseificador tipo Downdraft com garganta..... | 57 |
| GRÁFICO 4 – Calor específico dos gases de exaustão do motor em função da temperatura dos gases. | 65 |
| GRÁFICO 5 – Custo do combustível para taxas anuais de 2%, 8% e 14%..... | 77 |
| GRÁFICO 6 – Custo da eletricidade para taxas anuais de 2%, 8% e 14%..... | 77 |
| GRÁFICO 7 – Custo da água quente gerada pelo TC1 para taxas anuais de 2%, 8% e 14% | 78 |
| GRÁFICO 8 – Custo da água quente gerada pelo TC2 para taxas anuais de 2%, 8% e 14% | 78 |

| | |
|--|----|
| GRÁFICO 9 – Custo da água fria gerada pelo SRA para taxas anuais de 2%, 8% e 14% | 79 |
| GRÁFICO 10 – Comparação dos custos para uma taxa anual de 2 %, variando o período de amortização | 68 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

atm - Pressão (1 Atmosfera = 1,01325 bar)

C_p - Calor específico a pressão constante (kJ / kg.°K)

cp - : *Centipoise* (unidade de viscosidade no sistema CGS) (1 poise = N.s/m²)

CH₄ - Metano

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

C₂H₂ - Acetileno

C₂H₄ - Etileno

C₂H₆ - Etano

€ - Euro (moeda oficial da Comunidade Européia)

g - gramas

gmol - gramas/mol

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

H₂ - Gás Hidrogênio

SRA – Sistema de refrigeração por absorção

min - Minuto

MCI - Motor de Combustão Interna

MPa - Pressão em escala de 10⁶ Pa

N₂ - Nitrogênio

NO_x - Óxidos de nitrogênio

O₂ - Oxigênio

PCI - Poder calorífico Inferior

PCS - Poder calorífico Superior

Pol - Polegada (0,0254 m)

TIR - Taxa interna de retorno

ton - Toneladas

US\$ - Dólares americanos

C – custo do equipamento para uma grandeza de interesse S;

Cr – custo do equipamento para uma grandeza de referência Sr;

m – fator de incidência que indica a escala de economia.

1. INTRODUÇÃO

Os princípios básicos da gaseificação de biomassa são conhecidos desde o final do século XVIII. As primeiras aplicações comerciais foram registradas em 1830. Após a crise do petróleo iniciada no final de 1973, todos os países importadores de petróleo foram afetados, principalmente aqueles em desenvolvimento como o Brasil. Essa crise causou uma necessidade de se obter fontes alternativas de energia. Uma das alternativas colocadas em questão foi à utilização de combustíveis procedentes da biomassa via métodos termoquímicos (NIPE, 2002).

Devido aos custos envolvidos com transporte, a dimensão geográfica do território Brasileiro, e a existência de diversas comunidades em localizações geográficas isoladas, a gaseificação de pequeno porte, utilizando biomassa e com capacidades inferiores a 1000 Kg/h demonstra ser uma alternativa viável frente a estes casos energéticos.

O uso de pequenas instalações para a geração de eletricidade, por meio da combinação do gaseificador com um Motor de Combustão Interna (MCI) tem uma gama de aplicações muito vasta. O gás de síntese gerado pelo gaseificador pode ser utilizado no acionamento do motor, bastando haver para isso um processo de limpeza deste gás. Estes fatos fazem com que exista uma possível demanda de gaseificadores especialmente do tipo *Downdraft*, que podem ser utilizados para uma ampla variedade de biomassa, com simples, e algumas vezes nulos, pré-tratamentos da mesma. Nesse contexto, este tipo de instalação requer um simples manejo e manutenção, que lhe confere uma alta disponibilidade (G.P.T, 2005).

Considerando tudo isso, a gaseificação utilizando gaseificadores *Downdraft* resulta numa boa e interessante alternativa, frente aos atuais preços de outras fontes de energias como, por exemplo, do gás natural. Uma possível regulação do setor elétrico, no que se refere à eletricidade gerada a partir da biomassa, faria com que esta tecnologia obtivesse uma viabilidade econômica otimista para os anos vindouros (NIPE, 2002).

1.1 BIOMASSA E ELETRICIDADE

Através da fotossíntese, as plantas capturam energia do sol e transformam em energia química. Esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor. As fontes orgânicas que são usadas para produzir energias usando este processo são chamadas de biomassa.

Os combustíveis mais comuns da biomassa são os resíduos agrícolas, madeira e plantas como a cana-de-açúcar, que são colhidos com o objetivo de produzir energia. O lixo municipal pode ser convertido em combustível para o transporte, indústrias e até mesmo residências.

Os recursos renováveis representam cerca de 20% do suprimento total de energia no mundo, sendo 14% proveniente de biomassa e 6% de fonte hídrica. No Brasil, a proporção da energia total consumida é cerca de 35% de origem hídrica e 25% de origem em biomassa, significando que os recursos renováveis suprem algo em torno de 2/3 dos requisitos energéticos do País.

Em condições favoráveis a biomassa pode contribuir de maneira significativa para com a produção de energia elétrica. Estima-se que com a recuperação de um terço dos resíduos disponíveis seria possível o atendimento de 10% do consumo elétrico mundial e que com um programa de plantio de 100 milhões de hectares de culturas especialmente para esta atividade seria possível atender 30% do consumo (Internet: Fórum Capixaba de Mudanças Climáticas; Acessado em Julho de 2011).

A produção de energia elétrica a partir da biomassa, atualmente, é muito defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento e também outros países. Programas nacionais começaram a ser desenvolvidos visando o incremento da eficiência de sistemas para a combustão, gaseificação e pirólise da biomassa. Segundo pesquisadores, entre os programas nacionais bem sucedidos no mundo citam-se:

- O Proálcool no Brasil
- Aproveitamento de biogás na China
- Aproveitamento de resíduos agrícolas na Grã - Bretanha
- Aproveitamento do bagaço de cana nas Ilhas Maurício
- Coque vegetal no Brasil

No Brasil cerca de 30% das necessidades energéticas são supridas pela biomassa sob a forma de:

- Lenha para queima direta nas padarias e cerâmicas
- Carvão vegetal para redução de ferro gusa em fornos siderúrgicos e combustível alternativo nas fábricas de cimento do norte e do nordeste
- No sul do país queimam carvão mineral, álcool etílico ou álcool metílico para fins carburantes e para indústria química
- O bagaço de cana e outros resíduos combustíveis são utilizados para geração de vapor para produzir eletricidade, como nas usinas de açúcar e álcool, que não necessitam de outro combustível, pelo contrário ainda sobra bagaço para indústria de celulose

A tabela abaixo demonstra a situação de empreendimentos termelétricos no Brasil, classificando por fonte e situação. O bagaço de cana e o licor negro estão entre as fontes mais importantes, nos setores sucro-alcooleiro e de papel e celulose, respectivamente, além de diversos tipos de sistemas híbridos com combustíveis fósseis. O Plano Decenal de Expansão 2000/2009 estima o potencial técnico de co-geração nestes dois setores em 5.750 MW, com um potencial de mercado de pouco mais de 2.800 MW (Aneel, 2009).

Tabela 1: Potência instalada de termelétricas que utilizam combustíveis alternativos no Brasil. (Aneel, 2009).

| Combustível | Potência (kW) |
|------------------------------------|----------------------|
| Bagaço de Cana | 391,15 |
| Biomassa | 82,75 |
| Biomassa e Óleo combustível | 8,8 |
| Licor Negro | 310,18 |
| Licor Negro e biomassa | 142,9 |
| Lixo Urbano | 26,3 |
| Lixo urbano e gás natural | 600 |
| Total | 1562,08 |

1.2 LIMPEZA E FILTRAGEM DO GÁS DE BIOMASSA

A filtragem do gás de biomassa, produzido em um gaseificador, cumpre a finalidade de fornecer as qualidades de gás limpo, e de fluxo constante para os módulos de gás independente das flutuações e da contaminação do produtor de gás, devido a descontinuidades desses no gerador de gás (gaseificador) e na alimentação de combustível (Maniatis, 2005). A filtragem do gás tem a tarefa de remoção de partículas do gás produzido, bem como assegurar a pureza adequada quanto à carga de alcatrão. Aqui duas formas são possíveis: em primeiro lugar, uma combinação do gás de fluxo e a limpeza do gás por meio adequado, por outro lado, a separação do gás de fluxo por meio de uma filtração preliminar a quente para a separação de partículas, com posterior limpeza de gases de alcatrão e compostos particulados, em que deve ser dada atenção para os custos necessários, para posteriormente haver a correta separação de misturas e o processo de eliminação.

Pontos importantes que devem ser considerados:

- Toxicidade dos materiais. Implantação de processos e aparelhos para o tratamento ou de gestão de meios de produção (gasoso, líquido, sólido). Monitoramento da qualidade do gás de síntese produzido;
- Exigência de energia para a limpeza de gás (consumo de combustível total da planta);
- Processamento do gás produzido para garantir parâmetros mínimos para o gás de uso (como exemplo, a Tabela 1.2, que compara os valores de gás bruto [de partículas e teor de alcatrão] de um gaseificador *downdraft* com as exigências feitas no gás avaliado para ser usado no motor - torna-se evidente os parâmetros que a limpeza do gás em combinação com o resfriamento do gás tem de cumprir);
- Tratamento dos resíduos produzidos pelos gases;
- Medição de parâmetros de funcionamento;
- Riscos para a saúde (perigo de contaminação com resíduos e condensados);
- Perigo de incêndio e explosão;

Tabela 2: Teor de partículas e de carregamento de alcatrão, no gás de madeira com um gaseificador downdraft em comparação com os requisitos quando se utiliza o gás como combustível de um motor (Maniatis, 2005).

| | Valores de gás bruto (Gaseificador Downdraft otimizado) (mg/m³) | Requisitos de gás limpo para aplicação nos motores de combustão interna (mg/m³) |
|-------------------|---|---|
| Partículas | 100 - 1000 | Ao menos <50 Se possível <5 |
| Alcatrão | 100 - 500 | Ao menos <50 Se possível <25 |

1.3 ATUAL ESTADO DAS TECNOLOGIAS EMPREGADAS

O atual estado das tecnologias de limpeza de gases, em meios de gaseificação de biomassa, permite que os usos das tecnologias disponíveis ofereçam soluções tecnicamente viáveis para a limpeza do gás de síntese, em conformidade com os requisitos necessários para a utilização do gás (European Commission of Energy, 2009).

Muitas empresas oferecem sistemas de limpeza que incluem sofisticados separadores com fracionadores em colunas ou a *granel-droplet*. No entanto, estes sistemas não são práticos, pois os requisitos especificados para a pureza do gás, exigidas quando se tem no gás metais alcalinos, alcalino-terrosos, e pesados compostos metálicos, em combinação com a utilização de gases especiais (mistura que forma o tratamento secundário dos gases de escape) normalmente não são cumpridos.

Devido à experiência adquirida na construção de instalações de gaseificação de biomassa, deve se recair para conceitos tecnológicos já testados, com experiência de uso e fabricação. (Europe Commission of Energy, 2009)

Embora sejam interessantes, devido ao investimento e custos operacionais a serem abrangidos estas novas tecnologias que vieram para o mercado de filtragem de gás no último período de tempo, por exemplo, a quebra catalítica do alcatrão, não são suficientes em grande escala de produção devido ao não total domínio destas técnicas. Estas tecnologias exigem investigação mais intensiva. Acima de tudo, o seu comportamento em longo prazo é importante, para que possam ser aplicadas com sucesso e serem economicamente viáveis em plantas de gaseificação.

Os materiais residuais acumulados na limpeza dos gases são os resíduos resultantes da combustão incompleta da biomassa (Maniatis, 2005), que têm de ser posteriormente submetidos a tratamento, reciclagem e eliminação parcial, respectivamente. Por conta das propriedades físicas e químicas, as quantidades de materiais residuais resultantes não podem ser recicladas ou eliminadas sem tratamento adequado.

A alta eficiência desses coletores depende de diversos fatores. O tecido proporciona principalmente uma superfície sobre a qual as partículas podem ser recolhidas através dos quatro mecanismos:

- Coleta inercial - Partículas de poeira são capturadas na superfície das fibras, colocando-as perpendicularmente ao sentido do fluxo de gás em vez de mudar de direção.
- Intercepção - As partículas que não cruzam a corrente do fluido entram em contato com as fibras por causa do tamanho desta.
- Movimento browniano - Partículas submicrométricas são difundidas, aumentando a probabilidade de contato entre as partículas que estão cobrindo as superfícies.
- Forças eletrostáticas - A presença de uma carga eletrostática nas partículas e do filtro pode aumentar a captura de resíduos.

A combinação desses resultados forma os mecanismos de formação do bolo (cake) de partículas no filtro, o que conseqüentemente aumenta a resistência ao fluxo de gás. Dessa maneira, filtro deve ser limpo periodicamente (Reed, 1981).

1.4 PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA ESPECIFICAÇÃO DE FILTROS

Os parâmetros mais relevantes na especificação dos coletores de partículas incluem a velocidade do fluxo da corrente de ar criado pelo produtor de vácuo; de energia do sistema, a potência do motor, normalmente especificada em kW, a capacidade de armazenamento de partículas, e o tamanho mínimo das partículas

filtradas pela unidade. Outras considerações na escolha de um sistema de coleta de poeira incluem a temperatura, umidade, e a possibilidade de combustão do pó a ser recolhido (European Commission of Energy, 2009).

Os sistemas para a remoção de alcatrão só podem conter um sistema de filtração simples (como um saco de filtro ou cartucho). No entanto, a maioria das unidades utiliza um sistema de filtração primário e secundário. Em muitos casos, o calor ou a umidade pode prejudicar o meio filtrante de um filtro de mangas ou coletor de pó do cartucho. Um separador do tipo ciclone pode ser colocado antes destas unidades, para reduzir o calor ou a umidade antes de atingir os filtros. Além disso, algumas unidades podem ter mais de duas etapas de filtragem. Todos os processos de separação e filtração nos sistemas utilizados na unidade devem ser especificados.

1.5 FILTRAGEM DE GÁS DE SÍNTESE

O objetivo da filtragem dos gases produzidos em um gaseificador é a remoção de partículas do gás primário (gás de síntese), para reduzir os problemas nas etapas subsequentes das cadeias de processo restantes (resfriamento de gás, por exemplo, com o uso de trocadores de calor). A filtragem do gás pode ser dividida em filtragem de gases quentes, com filtros que resistem ao calor (a temperatura do gás bruto tipicamente acima de 500 °C e antes resfriamento do gás) e na filtragem de gases mais frios com filtros de manga (geralmente abaixo de 200 °C, após o resfriamento do gás). Elementos de filtro para filtragem de gases quentes consistem, tipicamente, de cerâmicas porosas, ou a sinterização de materiais porosos de outra magnitude (Alvin, 1995). A filtragem do gás a quente é interessante para utilização de gás a altas temperaturas (turbinas a gás e células a combustível). Secundariamente, pode ser interessante para diminuir a carga de partículas nos trocadores de calor durante o resfriamento do gás (Alvin, 1995).

1.6 ALCATRÃO

A condensação do alcatrão é evitada através da manutenção de uma temperatura mínima dos gases de produtores; por adição de adsorventes também é possíveis reduzir o teor de alcatrão na temperatura certa, a estrutura e níveis de concentração adequados (Alvin, 1996). A condensação de alcatrão excessiva levaria a falhas operacionais, porque a regeneração da superfície do sistema de filtro e dos aparelhos não seria possível.

Possíveis técnicas de filtragem do gás de síntese podem ser as seguintes (Alvin, 1996):

- Ciclone – Filtração em nível primário (antes do gás de refrigeração);
- Filtro de gás quente – de partículas sub-micrométricas (antes do arrefecimento do gás);
- Sistema de filtro de manga - de partículas micrométricas (após o resfriamento do gás);
- Outros filtros (filtro de leito de areia, cama de coque com ativos);

Pontos importantes que devem ser considerados (European Commission of Energy, 2009):

- Verificaram-se componentes voláteis perto do gás quente primário, antes do processo de arrefecimento do gás;
- O controle de temperatura no filtro de poeira (temperatura alta demais: danos ao filtro e unidades do sistema; temperatura suficientemente baixa: a condensação do alcatrão);
- Seleção do dispositivo de regeneração e revitalização dos agentes de limpeza;
- Exigência de energia auxiliar para dispositivos de aquecimento auxiliar;
- Remoção e reciclagem dos agentes e resíduos de filtragem de gás (fuligem, cinzas, poeira, etc);
- Elaboração de instruções de operação e manutenção para a filtragem de gases no sistema;
- Riscos para a saúde (o perigo de contaminação com resíduos e condensados);
- Perigo de incêndio e explosão;

1.7 EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE FILTRAGEM

Nas plantas de gaseificação de biomassa, muitos componentes são utilizados com a finalidade de atingir os parâmetros específicos de gás limpo. Os meios atualmente utilizados nos sistemas de filtragem são baseados na aplicação de processos de remoção de partículas na filtragem de gás de síntese, que interagem para cumprir os requisitos exigidos por plantas de gaseificação de biomassa (redução do teor de partículas e carregamento de alcatrão). Os sistemas são diferenciados de acordo com os seguintes fatores (European Commission of Energy, 2009):

- A fração de poluentes no gás de processo (poeira, alcatrão, metais pesados, alcalinos ou alcalino-terrosos) a ser eliminada;
- Meios de produção (meio úmido, meio seco);
- Mecanismos de separação;
- Temperaturas e pressões;
- Eficiência de separação;

Tendo em vista a temperatura de funcionamento, a separação de partículas de alcatrão ocorre em dispositivos individuais de retenção de partículas e purificação de gás. Na realização da filtragem, o gás de síntese e o alcatrão devem ser filtrados separadamente, e certos regimes de temperatura devem ser mantidos constantes, a fim de se evitar a condensação de alcatrão. Diferentes temperaturas de condensação podem ser esperadas (entre 150 e 250 ° C).

Tabela 3: Classificação das impurezas para cada processo de filtragem do gás. (Europe Commission of Energy, 2002)

| Escala de Temperatura | Tipo Básico | Eficiência | Sistema de Limpeza de gás |
|------------------------------|--------------------|---|---|
| 20 - 60°C | Úmido | Alcatrão, partículas, metais pesados, frações poluentes de gás. | Filtros do tipo manga, precipitador eletrostático ESP, Lavador Venturi. |
| 140-300°C | Seco | Partículas, metais pesados, frações poluentes de gás | Ciclone, Ciclone combinado com precipitador eletrostático |

| | | | |
|-------------|------|---|--------------------------------|
| 300 - 800°C | Seco | Partículas, frações poluentes de gás, frações de alcatrão | Filtração ciclone, depuradores |
|-------------|------|---|--------------------------------|

A Tabela 3 mostra a eficiência de separação para cada escala de temperatura. Observa-se a queda da eficiência de filtração dos meios úmidos em temperaturas mais baixas. A partir de tamanhos de grãos entre 1-2 μm em diante já não é possível alcançar a separação satisfatória de partículas primárias produzidas no gaseificador.

A garantia da eficiência de separação é uma condição fundamental para o funcionamento de uma unidade de condicionamento de gás, bem como a utilização do gás, uma vez que partículas com cargas elevadas contam com hidrocarbonetos condensados, metais pesados, bem como alcalinos e alcalino-terrosos. Metais pesados podem levar a disfunções e deficiências nos componentes de diversos sistemas de aproveitamento de gás (mistura de gases, controle de gás e sistema de segurança, de escape turbocompressor de gás, catalisador de oxidação, etc) (Europe Commission of Energy, 2002).

2. SISTEMAS PARA TRATAMENTO E REMOÇÃO DE ALCATRÃO

2.1 ADSORVEDORES DE LEITO FIXO

Os Adsorvedores de leito fixo promovem a quebra catalítica do alcatrão, fracionando-os em partículas menores, usando, por exemplo, o carvão ativado. À temperatura ambiente, um carregamento de carvão ativado com hidrocarbonetos alifáticos de 20 a 80 % de massa é atingido. A adsorção de leito fixo ilustrado na Figura 3 utiliza o coque com um granulometria de 0,56 a 1,0 mm (Alvin, 1995).

Esses adsorventes são utilizados para a separação de alcatrão, tratamento de águas residuais altamente contaminadas, e tratamento de gases produzidos em plantas de gaseificação de biomassa, preferencialmente. Adsorventes fixos foram freqüentemente utilizados em conceitos obsoletos de gás, para as operações de filtragem, mas não são capazes de cumprir as exigências do processo atual.

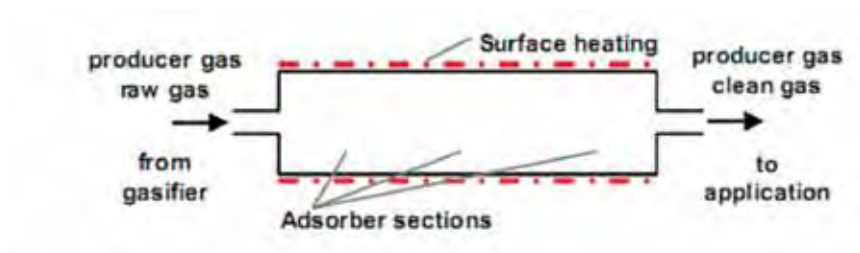


Figura 1: Adsorção de leito fixo para os compostos de alcatrão. (Alvin, 1995)

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO PARA REMOÇÃO DO ALCATRÃO.

Sistemas de tratamento térmico para remoção do alcatrão do gás de síntese, com base na oxidação parcial do gás produzido, carregados de contaminantes, podem ser utilizados após o gás ser expelido pelo gaseificador. A oxidação parcial converte alcatrão em detrimento do poder calorífico do gás produzido. O tratamento térmico do alcatrão é bastante incomum na filtragem do gás, este tipo de tratamento se apresenta mais como uma etapa de processo possível, para a redução do potencial de liberação de alcatrão do gás de síntese produzido. (Alvin, 1995)

2.3 TRATAMENTO CATALÍTICO PARA REMOÇÃO DO ALCATRÃO

O tratamento catalítico do alcatrão é baseado no princípio de processá-lo por meio da captura por fendas termoquímicas e reações com cal apoiadas por catalisadores. O processo de craqueamento leva a uma decomposição de compostos de alcatrão, o que resulta na formação de sucessivas quantidades de gás permanente, fases e compostos de pesos moleculares menores que o alcatrão. Em contraste com o tratamento catalítico-térmico, onde as temperaturas acima de 1000°C são necessárias, as reações catalíticas ocorrem em um nível de temperatura mais baixa, segundo a qual o gaseificador a certa tomada de temperatura é suficiente para o nível filtragem de gases, e pode ser usado sem um aumento significativo de temperatura (Mettesson, 1987).

A regeneração do alcatrão está em fase de testes. Os problemas são principalmente relatados em relação à vida útil menor dos catalisadores, devido a compostos particulados perigosos presentes no produtor do gás de síntese (compostos de enxofre, metais pesados, etc.) que aderem ao catalisador. Em geral, tem de ser

realizada a separação antes da conversão catalítica, a fim de ser capaz de fornecer um gás livre de particulados a um nível de temperatura adequado para o tratamento do alcatrão catalítico.

3. TIPOS DE FILTROS E TÉCNICAS DE FILTRAÇÃO

Uma característica comum de todos os filtros separadores é a utilização de meios filtrantes que podem cumprir uma função de captura, por exemplo, tecidos permeáveis, ou materiais porosos sinterizados. O gás a ser limpo é transmitido através do meio filtrante. Vários mecanismos podem provocar a separação das partículas que são transportadas no gás-fluxo. A diferenciação é feita entre superfície e a profundidade de filtração, a separação ocorre dentro do meio, gerando um mecanismo de filtração de profundidade.

Na operação de unidades de filtração, uma camada de poeira se forma na superfície (filtro bolo) do meio filtrante. A constante acumulação de partículas sobre esta superfície é designada como filtração de superfície (Mettesson, 1997). No interior desta camada de filtro, dependendo da granulometria do filtrado e do tipo de partículas de poeira, uma camada de superfície porosa é formada, que oferece um meio filtrante com boas características para a separação de partículas ultrapequenas.

3.1 FILTROS DO TIPO MANGA (*BAGHOUSE*)

Nos filtros tipo manga, os sacos são presos em uma placa de células no fundo do dispositivo e suspenso em uma moldura ajustável na parte superior do dispositivo. O fluxo de gás normalmente entra no filtro de manga e passa através da bolsa a partir do interior dos sacos.

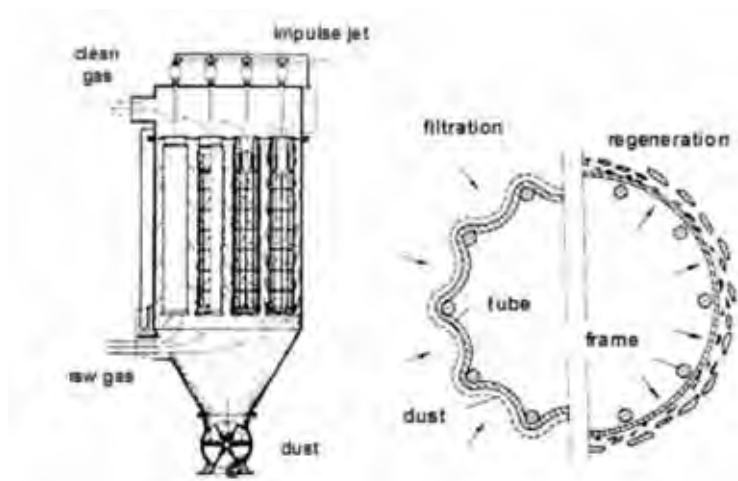


Figura 2: Sistema de filtragem do tipo manga com regeneração por choque de pressão. (Alvin, 1995)

O principal parâmetro é a perda de pressão, que influencia a duração da filtração. As partículas separadas durante um período de tempo formam uma camada de filtro (*cake*), que provoca uma perda de pressão.

Esquematisado na figura 2, temos uma representação de um meio filtrante para filtração de profundidade. A perda de pressão varia de 2-15 bar. Após atingir a pressão máxima especificada, a perda gerada pela camada no filtro é regenerada pelo meio filtrante. Os filtros são feitos de materiais como tecido, PVC, PS, telas e feltros. Dependendo da definição de tarefa geral, as condições de aplicação, por exemplo, temperatura de operação, pré-agente de revestimento, tamanho de grão, distribuição do tamanho de partículas, pode-se ocorrer à utilização de uma grande variedade de materiais (Alvin, 1995).

Tabela 4: A estabilidade em função da temperatura em cada material filtrante típico

| Temperatura | Material típico do filtro |
|--------------------|---|
| <100°C | Pvc, Poliéster |
| 150-300°C | Fibra de Vidro, PTFE |
| 300-600°C | Lã de carneiro, cerâmicas (alumina, mulita), quartzo e grafita. |
| >600°C | Cerâmicas fibrosas de alumina, quartzo, cerâmicas granulares de silicatos, carbetos de silício ou alumina. |

A formação de uma camada no filtro (que pode ser facilmente separada pelo meio filtrante) é um pré-requisito para o comportamento operacional satisfatório, a respeito da perda de pressão e capacidade de separação, com partículas muito pequenas, em que muitas vezes é necessário aplicar uma pré-camada de revestimento de pedra e de cal em pó, carvão ativado, etc, para o filtro de tecido, antes da filtração. Isso substitui o filtro de camada, que é necessário para a filtragem, reforça as propriedades de filtração, e ainda serve para proteger o material do tubo do filtro.

Para a separação de partículas pegajosas da camada interna do filtro, pode ser necessário um revestimento com um agregado inerte (pó de calcário, por exemplo) (Mettesson, 1987).

Enquanto o primeiro protege o meio filtrante da penetração de partículas e garante a boa regeneração, o último garante a formação de um pó solto, um bolo de poeira que permite o escoamento com a perda de pouca pressão.

3.2 FILTROS DO TIPO MULTIVELAS (CARTUCHOS)

Os filtros multi-velas consistem de uma camada metálica (média a alta temperatura) ou cerâmica (Al_2O_3 , SiO_2 , MnO - alta temperatura) de material de base permeável. O filtro neste caso, é um corpo rígido e poroso, cujos inter-espacos de grãos permitem a passagem do gás, mas impedem a passagem de determinadas partículas de pó (dependendo do tamanho do grão e da distribuição do tamanho de partículas). A matriz porosa de filtração, por conseguinte, indica os menores espacos entre os interporos, que tem dimensões menores do que as partículas de pó a ser filtrado. Ao cobrir o filtro do tubo com pré-agentes de revestimento, poeiras e aerossóis para fornecer uma segunda camada de filtração (superfície de filtração), o efeito de filtragem é intensificado e as eficiências de separação são alcançadas. Estes sistemas de filtro podem ser usados em temperaturas acima de 500 °C, e atingir uma excelente eficiência de separação.

Coletores de cartucho são comumente usados como coletor de pó. Ao contrário dos coletores em filtros de manga, em que os meios de filtragem são um tecido ou sacos de feltro, este tipo de coletor utiliza cartuchos de metal perfurado, que contêm camadas de tecidos filtrantes. O tamanho do coletor é dimensionado de acordo com a coleta de partículas. Devido ao seu *design*, a área total de filtragem é maior do que em um saco

convencional de mesmo diâmetro, resultando em redução do fluxo de ar em relação aos meios de comunicação e redução da queda de pressão, em geral.

A regeneração dos sistemas de filtragem é realizada por meio de um choque de pressão. Ligado contra o meio filtrante rígido, o efeito sobre a regeneração do filtro não é suportado por um movimento elástico do meio filtrante (filtro de regeneração) e o movimento da membrana têxtil. A separação das camadas de filtro é, portanto, efetuada apenas por meio da pressão de choque de regeneração do gás, o que exige gastos consideravelmente maiores de fluidos limpadores de gás (azoto, dióxido de carbono, etc.).

Geralmente se inclui uma caixa de aço contendo meio filtrante poroso, que separa partículas finas de poeira de um fluxo de ar sujo. O meio filtrante mais comum usado nos coletores são sacos de filtros e cartuchos. Partículas de pó acumuladas no lado de fora da mídia formam um revestimento chamado "bolo de poeira" (*cake*). É essa camada que faz o trabalho de filtragem de partículas finas. O bolo e a queda de pressão através do saco de filtro aumentam a probabilidade de contato entre as partículas por toda a superfície filtrante.

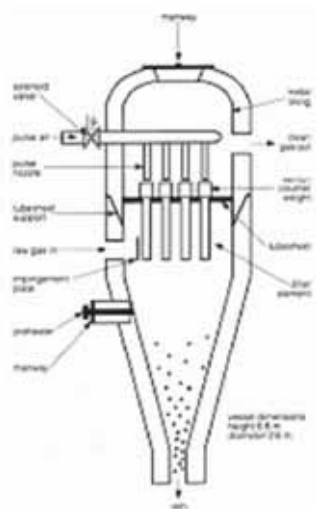


Figura 3: Filtros de vela Multi-camada.

3.3 FILTROS CERÂMICOS DO TIPO *CROSS-FLOW*

Em engenharia e purificação de proteínas, a filtração *crossflow* (também conhecida como filtração de fluxo tangencial) é um tipo de filtragem. A filtração *crossflow* difere dos variados tipos de filtração, em que a alimentação é passada através

de uma membrana ou camada, com os sólidos estando presos no filtro e o filtrado sendo liberado na outra extremidade. (Innocentini, 1997) A filtração tangencial recebe este nome porque a maioria do fluxo de alimentação viaja tangencialmente através da superfície do filtro, ao invés de diretamente para o filtro (Mettesson, 1987). A vantagem deste princípio é que a torta (*cake*) de particulados que se forma sobre o filtro (e que pode entupir o filtro) são substancialmente removidas durante o processo de filtração, aumentando o período de tempo que uma unidade de filtro pode ser operacional. Este é um processo contínuo, ao contrário do lote final de filtração.

Este tipo de filtração é normalmente selecionado para reações contendo uma alta proporção de pequenas partículas sólidas, (onde o permeado é de maior valor) pelo fato de o material sólido poder rapidamente formar blocos (cegos) na superfície de filtração, com a formação de entupimento. Exemplos industriais do uso deste tipo de filtração incluem a extração de antibióticos solúveis em águas de fermentação. A tecnologia *crossflow* de filtração, por ser prática e simples, está ganhando rapidamente aceitação global como uma importante etapa em muitas linhas de processos na indústria mundial de alimentos, laticínios, farmacêutica/biotecnologia e indústrias de amido e adoçantes. A habilidade de produzir separações muito específicas em baixas temperaturas sem mudança de estágio pode, em muitas aplicações, tornar a filtração por membranas uma solução muito mais efetiva economicamente do que métodos mais convencionais, tais como filtração rotativa a vácuo ou filtros de pressão.

Na filtração de fluxo cruzado, a alimentação é passada através da membrana filtrante (tangencialmente) com pressão positiva em relação ao lado do permeado. Uma parte do material que é menor que o tamanho dos poros contidos na membrana passa através da mesma, o que permeia o filtrado. O resto é mantido no lado de alimentação da membrana como retentor conforme figura 4.

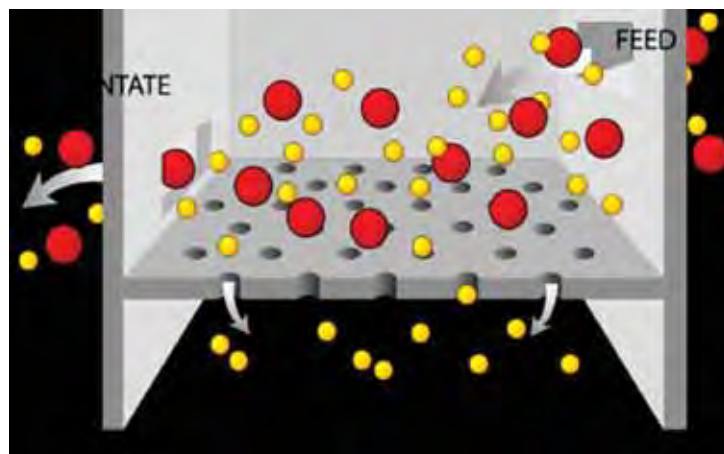


Figura 4: Esquema do processo de filtração tipo cross-flow.

A filtração de fluxo cruzado é uma técnica interessante de remoção de partículas. O movimento tangencial do volume do fluido através da membrana faz com que as partículas na superfície do filtro sejam removidas. Isto significa que um filtro de fluxo cruzado pode operar continuamente com uma carga relativamente alta de sólidos sem entupir.

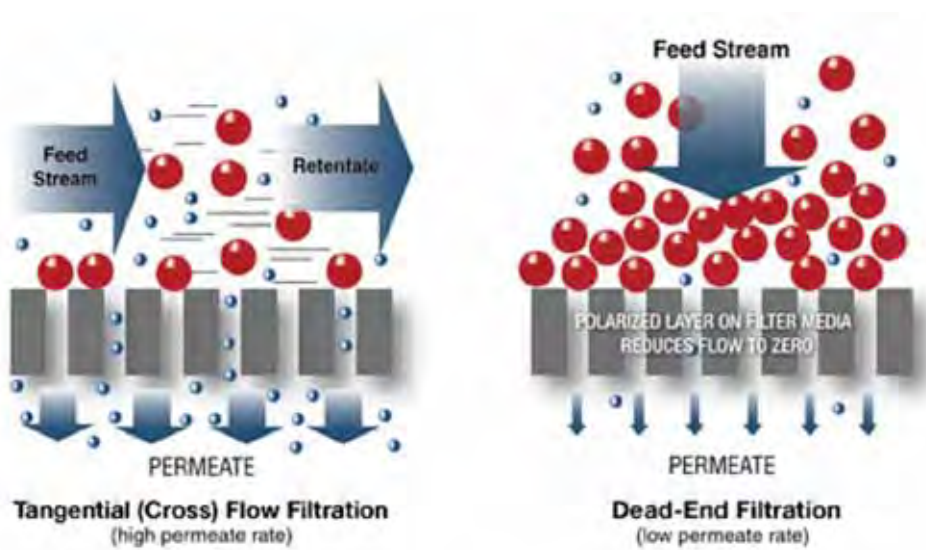


Figura 5: Fluxo do gás e filtrado durante um processo *crossflow*.

A Figura 5 apresenta o esquema de um filtro cerâmico do tipo *crossflow*. Este é diferenciado principalmente por sua geometria e a direção dos fluxos de gás, através do meio filtrante. Uma característica decisiva da vantagem desta técnica é a sua área de filtração de 7 a 10 vezes maior, em comparação com a área de um filtro comum (manga, multi-velas), devido à geometria mais complexa (Innocentini, 1997). A capacidade de separação, a perda de pressão e a regeneração do tipo de cooperação são comparáveis aos do filtro de vela.

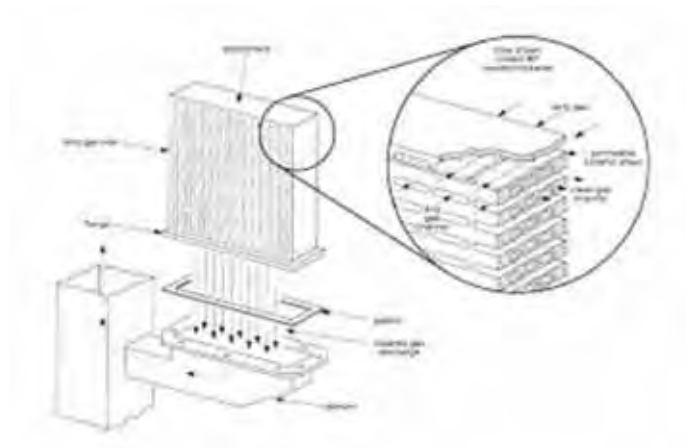


Figura 6: Filtro Cerâmico do tipo *CrossFlow*.

Benefícios da técnica de filtração *crossflow* em relação aos demais processos de filtração:

- A taxa global de remoção de líquidos é alcançada pela formação do *cake* de partículas no filtro;
- O *feed* do processo permanece sob a forma de uma suspensão coloidal, passível de transformação;
- O teor de sólidos e das partículas retidas pode variar em uma ampla faixa granulométrica;
- É possível fracionar partículas por tamanho;

3.4 PRECIPITADORES ELETROESTÁTICOS (ESP'S)

A separação de partículas em um precipitador eletrostático é baseada no efeito da força eletromagnética sobre partículas eletricamente carregadas, em um campo eletrostático - a operação de regeneração é caracterizada por três processos básicos:

- Carga elétrica das partículas;
- A separação das partículas carregadas por forças eletrostáticas de atração em um campo eletrostático;
- Remoção da poeira coletada contida nos eletrodos;

As partículas de poeira entram no tubo-filtro ESP a partir de baixo, e são submetidas ao campo elétrico a poucos centímetros de seu movimento. As partículas carregadas são atraídas para longe da parede do tubo, devido ao campo elétrico - veja a Figura 7.

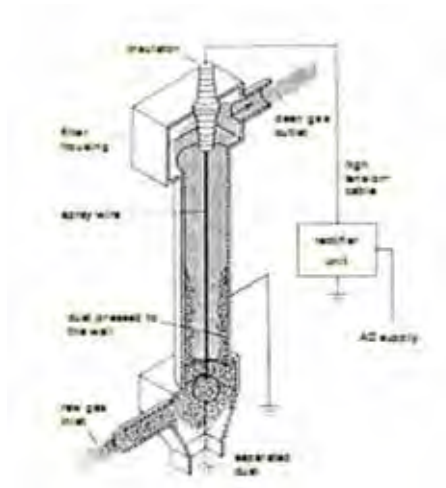


Figura 7: Configuração esquemática de um filtro ESP (Paasen *et al.*, 2004).

O efeito de separação em ESP é descrito pela equação de Deutsch (Paasen *et al.*, 2004). Essa regra de cálculo permite a estimativa do grau de separação de poeira nas dependências da superfície do filtro, a velocidade média de migração de partículas, e o volume de gás no tubo.

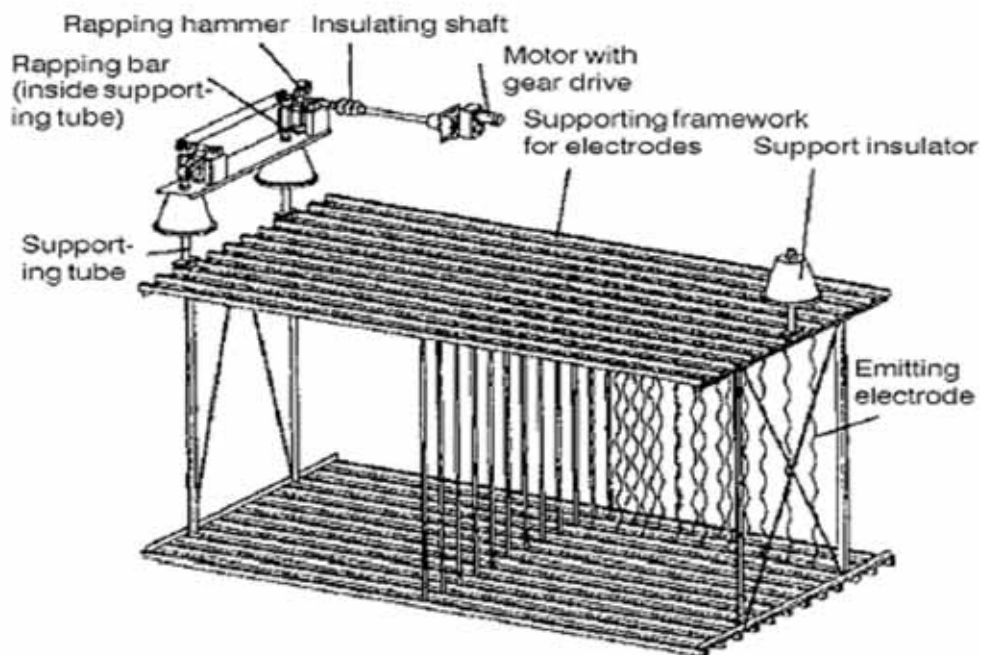


Figura 8: Esquema de funcionamento de filtro baseado em precipitação eletrostática (ESP) (Paasen *et al.*, 2004).

3.5 DEPURADORES

3.5.1 Depuradores via úmida combinados com precipitadores eletroestáticos (Wet ESPs)

Além da possibilidade do uso de precipitadores eletroestáticos ESPs (Figura 8), há também a possibilidade de usar ESPs combinados com depuradores. Esse aparelho apresenta vantagens em relação ao uso de somente precipitadores eletroestáticos. As vantagens são a melhor separação da condensação de compostos de alcatrão, de partículas de poeira, etc. As aglomerações (poeira e carga de alcatrão) recolhidas e depositadas sobre os eletrodos podem ser removidas com o uso do líquido de lavagem.

Deve ser dada atenção à mistura e acumulação de partículas poluentes e condensados com carga, cujo tratamento requer custos adicionais. Purificadores *Wet* são utilizados para capturar partículas relativamente pequenas. Na maioria dos sistemas de filtragem úmida, as gotas produzidas são geralmente maiores que 50 micrômetros (no intervalo 150-500 micrômetros). Como ponto de referência, cabelo humano varia de diâmetro 50-100 micrômetros. A distribuição de tamanho de partículas deve ser

conhecida a fim de se evitar a formação de um *cake* carregado que possa entupir o meio filtrante.

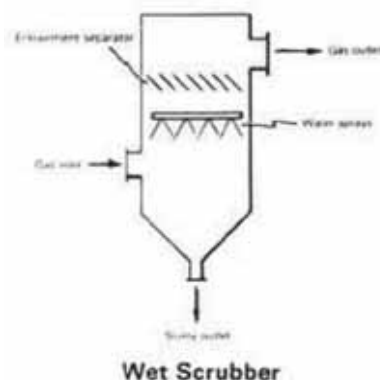


Figura 9: Wet ESPs

Por exemplo, partículas produzidas por processos mecânicos (trituração ou moagem) tendem a ser grandes (acima de 10 micrômetros), e as partículas produzidas a partir de combustão ou uma reação química terá uma parcela considerável de partículas pequenas e submicrométricas (ou seja, menor que 5 micrômetros).

Os tamanhos mais críticos de partículas são aqueles no intervalo 0,1-0,5 micrômetros, porque estas são as mais difíceis em relação à captura pelo meio de filtração. Os principais fatores que afetam um filtro do tipo Wet Esps são: (Internet: Revista meio filtrante; Consultado em: Setembro de 2011).

- Impactação inercial: representa a “batida” da partícula contra um obstáculo, fazendo com que a partícula que estava em movimento diminua a sua energia e se separe do fluxo gasoso, podendo ou não se depositar no corpo coletor. Neste mecanismo é evidente a influência da velocidade e da massa das partículas. É um mecanismo importante para partículas de diâmetros maiores que 0,5 μm . O controle de partículas por impactação é geralmente conseguido através de pequenos obstáculos secos (fibra do tecido, por exemplo) ou úmidos (gotas).
- Interceptação: é um mecanismo de coleta que pode ser considerado como um caso limite da impactação, pois ocorre quando uma partícula segue o fluxo de gás entre as fibras do tecido, tendo um raio maior que o espaçamento entre as fibras. Assim, as partículas batem na fibra no qual são capturadas. Quanto maior

a relação diâmetro da partícula/diâmetro do coletor, maior será o efeito da intercepção.

- Difusão: as partículas são tão pequenas e têm pouca massa que podem ser influenciadas pelo bombardeamento de moléculas de gás ao redor da partícula que afeta o caminho até colidir na fibra. Mecanismo de coleta que apresenta importância para partículas de diâmetros menores que 1 μm e baixas velocidades de filtração. Quanto menor o tamanho da partícula melhor este mecanismo trabalha, pois em função da sua energia térmica, estão em constante movimento similarmente ao que ocorre com as moléculas dos gases (“movimento Browniano”). É diretamente proporcional à temperatura e inversamente proporcional à velocidade da partícula e ao diâmetro da partícula
- Nucleação e condensação: Se um gás que passa através de um meio filtrante é resfriado abaixo do ponto de sublimação, a condensação de umidade ocorre nas partículas filtradas, condensando-as e aumentando o seu tamanho. Este aumento da dimensão das partículas facilita a retenção destas.
- Separação gás-líquido: Independentemente do mecanismo de filtração usado, tanto o líquido quanto partículas devem ser removidas quando possível. Uma vez que o contato é feito, as partículas de poeira e gotículas de água se combinam para formarem aglomerados. Como os aglomerados crescem, eles se estabelecem em um *cake*.

4. ESTUDO DOS MATERIAIS E TÉCNICAS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DOS FILTROS

4.1 FILTROS CERÂMICOS

Na gaseificação de biomassa, os filtros cerâmicos são uma alternativa interessante, pois aliam o baixo custo de produção e manutenção com uma capacidade de remoção de partículas elevada dos meios de gaseificação de biomassa. Essa remoção pode ser mensurada, dependendo o tamanho dos poros do filtro, que podem ser medidos por meio de controle e da distribuição de partículas, no processo de compactação e posterior sinterização.

Os filtros cerâmicos têm despertado grande interesse tecnológico por resistirem a temperaturas superiores a 1000°C, apresentando alta eficiência de filtração e baixo custo de fabricação e manutenção. Entre várias aplicações dos filtros cerâmicos destacam-se queima de resíduos, refinamento de metais, filtração de partículas em meios de combustão de óleo diesel e filtração de gases quentes (Coronado, 2007). Nos últimos anos, o uso de filtros cerâmicos tem despertado grande interesse tecnológico, por resistirem a temperaturas superiores a 1000°C, filtrando, com extrema eficiência, e com baixo custo na fabricação e manutenção (Muller *et al.*, 2009).

Entre as diversas aplicações tecnológicas dos filtros cerâmicos, destacam-se a utilização de resíduos domésticos, hospitalares e industriais em incineração e craqueamento catalítico, refino de metais, combustão de diesel em veículos automotivos e em filtração de gases quentes. Em filtração de gases a temperaturas elevadas, na faixa de 300-900°C, o fluxo do gás do processo de combustão é conduzido por meio de filtros cerâmicos. A filtragem do fluxo do gás é exigida para satisfazer às severas normas ambientais impostas pela legislação no controle da emissão de particulados e também para impedir a corrosão e erosão das lâminas de turbinas e outros componentes (Muller *et al.*, 2009).

| Dimensão | 1,0mm | 100microns | 10 microns | 1micron | 0,1 micron | 0,01 μ |
|---|------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|------------|------------|
| Principais tipos de poluentes | ← Areia → | ← Poeiras Atmosféricas → | ← Fumaça de Cigarro → | | | |
| | ← Chuva/ Neblina/ Nevoeiro → | | ← Fumos de Solda → | | | |
| | ← Pólen → | ← Bactérias → | ← Pó de Cimento → | ← Névoas de Óleo → | | |
| | ← Fungos → | | ← Óxido de Metais → | | | |
| | ← Pó de Carvão → | | ← Névoas de NOx e SOx → | | | |
| | ← Areia de Fundição → | | ← Negro de Fumo → | ← Vírus → | | |
| Identificação | ← Olho nu → | ← Microscópio → | | ← Microscópio Eletrônico → | | |
| Faixa prática de trabalho dos principais tipos de coletores | Coletor Gravitacionais | | | | | |
| | Ciclones | | | | | |
| | Multiciclones | | | | | |
| | Lavadores de Gases | | | | | |
| | Filtros de Mangas | | | | | |
| | Filtros Eletrostáticos | | | | | |
| Filtros Absolutos | | | | | | |

Figura 10: Características de diversos meios de filtração. (Internet: Revista Meio Filtrante; Consultado em: Setembro de 2011)

O filtro ideal é aquele que combina elevada permeabilidade com a capacidade de separação do filtrado. Ao se reduzir o diâmetro do poro filtrante diminui-se a vazão de acordo com a lei de Poiseuille, isto é, com a quarta potência do seu diâmetro (Muller *et*

al., 2009). Portanto, é necessário que a membrana filtrante tenha elevada porosidade e seja constituída de um sistema de poros percolados. Para que o filtro atinja suas finalidades a distribuição do diâmetro de poros deve ser estreita e unimodal. Poros de pequeno diâmetro com estrutura uniforme exigem o uso de pós de baixa granulometria com distribuição estreita de tamanho de partícula. Devido à alta capacidade de sinterização desses pós finos o controle da porosidade é atingido através da temperatura e do tempo de sinterização.

4.2. TIPOS DE FILTROS PARA GASES QUENTES

Os filtros cerâmicos para gases quentes podem ser classificados de acordo com as suas propriedades em dois grandes grupos, fibrosos e granulares. O uso de filtros fibrosos tem se destacado por ser umas das melhores alternativas na filtração de partículas na faixa submicrométrica, por apresentar alta porosidade, alta área superficial e, principalmente, alta permeabilidade, em razão de sua eficiência de coleta ser muito alta e a queda de pressão baixa; porém, essa classe de filtros geralmente apresenta baixa resistência mecânica (Muller *et al.*, 2009).

4.3 MATERIAIS FIBROSOS OU GRANULARES EMPREGADOS EM FILTROS

Uma característica da operação unitária de filtração de partículas sólidas presentes em um fluido é a diversidade de equipamentos disponíveis. Tal diversidade por sua vez tem sido conseqüência da multiplicidade dos problemas de filtração, nas quais partículas, em suspensões de alta ou baixa concentração, devem ser separadas dos gases, que podem ser corrosivos e, em alguns casos, explosivos (Innocentini, 1997). De acordo com suas estruturas e constituintes, os filtros cerâmicos podem ser divididos em duas categorias principais: filtros granulares e fibrosos. Os principais candidatos cerâmicos para o uso de filtros são cordierita, mulita, alumina e carbetto de silício. As exigências para esses filtros cerâmicos, cuja função principal é remover as partículas entre 0,2 e 10 μm , são: permeabilidade elevada, porosidade de 50 a 80%, resistência à erosão e resistência ao choque térmico.

De acordo com os materiais indicados para cada tipo de aplicação, o filtro depende criticamente da microestrutura e das propriedades mecânicas e térmicas associadas a esses materiais (Muller *et al.*, 2009). A eficiência dos meios fibrosos para remover os materiais particulados depende de diversos fatores, incluindo diâmetro e orientação das fibras, velocidade e carga de particulados no fluido (Alvin, 2004). A coleta das partículas presentes em um fluxo de gás ocorre através de vários mecanismos. No caso de filtração de ar em meios fibrosos, o mecanismo difusional é mais eficiente para partículas menores que $0,2 \mu\text{m}$. Os mecanismos inercial, gravitacional e de interceptação direta são mais eficientes na filtração de partículas maiores que $2 \mu\text{m}$. Desta maneira, a eficiência total de coleta das partículas é admitida como sendo uma combinação de todos os mecanismos (Muller *et al.*, 2009). Idealmente, o filtro cerâmico deve remover o máximo de impurezas com a mínima resistência ao fluido de arraste. Permeabilidade, eficiência de coleta e resistência mecânica são parâmetros que devem ser otimizados de acordo com o processo de interesse. As interações complexas e dinâmicas que ocorrem entre as partículas e a superfície do filtro, no entanto, tornam o comportamento do filtro cerâmico especialmente dependente das condições de operação e do tipo de aerossol envolvido.

4.4 CONCEPÇÃO DO FILTRO DESENVOLVIDO

O uso de filtros rígidos cerâmicos já provou ser uma das melhores tecnologias na filtração de partículas na faixa sub-micrométrica. As resistências térmica, química e mecânica, além da altíssima eficiência de coleta, parecem ser insuperáveis por qualquer outro equipamento de filtragem operando ao mesmo custo. Inicialmente, foi escolhido como meio filtrante o filtro de tipo manga. Esse tipo de filtro é de fácil construção e operação, podendo ser confeccionado com baixo custo. A partir da análise das tabelas 13 e 14, fica claro que um gaseificador de leito fluidizado produz um teor médio de alcatrão, e baixo teor de particulados. O filtro do tipo manga, pela análise da tabela 15, possui taxa de remoção de particulados entre 70-95% e de alcatrão na faixa de 0-50%. De acordo com a tabela 14, para o gás de síntese ser inserido em um motor de combustão interna, é necessária uma redução para valores menores de $50\text{mg}/\text{nm}^3$. Dessa maneira, o uso deste tipo de filtro é adequado ao projeto, além de ser economicamente viável devido a seu baixo custo. A utilização de um filtro de manga de

poliéster no presente trabalho só foi possível devido a utilização de um trocador de calor na saída do gaseificador, logo após o ciclone. Ao sair do trocador de calor, o gás se encontra numa faixa temperatura de 60 a 80°C, sendo que a temperatura máxima de trabalho do filtro de poliéster é de 150°C. Para a utilização de um filtro logo após o ciclone, não é possível a utilização de filtros de manga, devido à temperatura de trabalho máxima destes ser de 250°C, como no caso do Politetrafluoretileno (Teflon). Porém a temperatura de trabalho do gás após o ciclone varia na faixa de 500 a 700°C, por isso esse trabalho sugere o uso de um filtro cerâmico para a remoção dos particulados presentes no gás, já que os filtros cerâmicos resistem a temperaturas maiores que 1000°C.

Tabela 5: Dimensões, considerações técnicas, e materiais a serem utilizados na confecção de um filtro cerâmico para o uso na remoção de alcatrão e particulados no gás de síntese produzido pela biomassa.

| Propriedades | Unidade | 05-20 | 10-20 | F-20 |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Tamanho de partícula do gás | μm | <0,3 | 0,3 | 0,5 |
| Material de suporte | | SL N 20 | SL N 20 | SL N 20 |
| Tipo de membrana | | DIA 05 Grãos de Mulita | DIA 10 Grãos de Mulita | DIA F Grãos de Mulita |
| Porosidade do material de suporte | % | 35 | 35 | 35 |
| Densidade do material | g/cm^3 | 1.85 | 1.85 | 1.85 |
| Permeabilidade Específica | 10^{-13}m^2 | 25 | 55 | 110 |
| Força de dobra | MPa | >20 | >20 | >20 |
| Máxima temperatura de resistência | °C | 1000 | 1000 | 1000 |
| Filtragem de gás quente (atmosfera) | °C | 850 | 850 | 850 |

| | | | | |
|--|---------------|-------|-------|-------|
| oxidante) | | | | |
| Filtragem de gás quente (atmosfera redutora) | °C | 650 | 650 | 650 |
| Coefficiente térmico de expansão (25 – 1000) | $10^{-6} / K$ | 5.1 | 5.1 | 5.1 |
| Dimensões (Do-Di) | mm | 60/40 | 60/40 | 60/40 |

Tabela 6: Classificação de filtros a ar segundo normal ABNT. (Internet: Beckins; consultado em: Agosto de 2011)

| CLASSIFICAÇÃO ABNT - NBR 16401 | | | |
|---|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| FILTROS GROSSOS E FINOS | | | |
| ASHRAE 52.1 | | | |
| Grupo de Filtros | * Classe de Filtragem | Arrestance % | Eficiência % |
| G GROSSOS (Arrestance %) | G1 | $50\% \leq A < 65\%$ | ----- |
| | G2 | $65\% \leq A < 80\%$ | ----- |
| | G3 | $80\% \leq A < 90\%$ | ----- |
| | G4 | $A \geq 90\%$ | ----- |
| F FINOS (Dust Spot Efficiency %) | F5 | ----- | $40\% \leq Ef < 60\%$ |
| | F6 | ----- | $60\% \leq Ef < 80\%$ |
| | F7 | ----- | $80\% \leq Ef < 90\%$ |
| | F8 | ----- | $90\% \leq Ef < 95\%$ |
| | F9 | ----- | $Ef \geq 95\%$ |

* Classificação EN 776 (Norma Européia)

Tabela 7: Classificação de filtros a ar segundo normal internacional. (Internet: http://www.beckins.com.br/tabela_classificacao.asp consultado em: Agosto de 2011)

| CLASSIFICAÇÃO NORMA EUROPEIA EN 1822 | | |
|---|---------------------|--------------------------------------|
| FILTROS ABSOLUTOS | | |
| Grupo de Filtros | Classe de Filtragem | Eficiência para partículas 0,3 μ |
| H HEPA | H10 | 85% |
| | H11 | 95% |
| | H12 | 99,5% |
| | H13 | 99,95% |
| | H14 | 99,995% |
| Eficiência para partículas 0,12 μ | | |
| U ULPA | U15 | 99,9995% |
| | U16 | 99,99995% |
| | U17 | 99,999995% |



Figura 11: Filtro de manga de poliéster confeccionado.

Tabela 8: Temperatura de trabalho e agentes químicos agressivos ao material da manga (Pacheco, 2007).

| Sigla | Material | Nome Comercial | Temp. de Trab. | H2O | O2 | SO2 | NO2 | Solventes | Álcalis |
|--------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|------------|------------|------------------|----------------|
| PP | Polipropileno | - | 90 °C | l | l | l | l | n | l |
| PA | Poliamida | Nylon | 110°C | n | l | n | l | s | l |
| AC | Poliacrilonitrila Copolímero | Acrílico | 110°C | s | l | n | n | l | n |
| DT | Poliacrilonitrila Homopolímero | Dralon-T | 120°C | l | l | n | n | l | n |
| PE | Poliéster | - | 150°C | n | l | n | n | l | n |
| NO | m-Aramida | Nomex, Comex | 180°C | n | s | n | n | l | n |
| PPS | Polifenilsulfeto | Ryton, Procon | 190°C | l | n | s | l | l | l |
| PI | Poliamida Aromática | P84 | 240°C | s | n | n | l | l | l |
| PTFE | Politetrafluoretileno | Teflon | 250°C | l | l | l | l | l | l |

Legenda: l = resiste bem; s = resistência moderada; n = baixa resistência

Devido às baixas temperaturas de trabalho dos filtros de manga, estes não são apropriados para a utilização no protótipo do gaseificador Downdraft, logo após o ciclone, uma vez que a temperatura de trabalho do gaseificador nesta região, em torno de 500 a 700°C, é maior que aquelas resistidas pelos filtros de manga. Para a utilização dos filtros de manga, é necessária uma refrigeração do gás de síntese antes da passagem pelo filtro, por isso utilizou-se um trocador de calor logo após o ciclone, e foi implantado um filtro de poliéster.

Tabela 9: Resistência da manga a diversos tipos de particulados (Pacheco, 2007).

| Nome Genérico | Resistência a Abrasão | Resistência a ácidos | Resistência a Alcalis | Resistência a agentes oxidantes | Resistência a Solventes | Temperatura máxima de operação (°C) |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Acetato – Acetato de celulose | Boa | Razoável | Pouca | Boa | Boa | 100 |
| Acrílico | Boa | Boa | Razoável | Boa | Excelente | 150 |
| Fibra de Vidro | Pouca | Excelente | Pouca | Excelente | Excelente | 300 |
| Nylon | Excelente | Razoável | Boa | Razoável | Boa | 100 |
| Poliéster | Excelente | Boa | Excelente | Boa | Boa | 150 |
| Polietileno | Boa | Boa | Boa | Razoável | Boa | 75 |
| Polipropileno | Boa | Excelente | Excelente | Boa | Boa | 120 |
| Algodão | Boa | Pouca | Razoável | Boa | Excelente | 100 |

Em relação a custos, os filtros cerâmicos demonstram ser uma alternativa viável e condizente com a nossa proposta econômica, onde os custos envolvidos são baixos. Os materiais selecionados, Alumina, Mulita e Cordieirita são materiais de baixo custo, no qual suas propriedades específicas, em termos de porosidade podem ser obtidas por modificações nos parâmetros de sinterização. Essas modificações são relativas a composição de cada material empregado. Foi identificado um maior custo para a cordieirita e um menos custo para a Alumina. Em relação as técnicas de filtração, a do tipo Cross Flow demonstrou ser a economicamente mais viável, pois ao mesmo tempo em que remove os particulados para o teor adequado, o emprego pode ser feito diretamente com o gás de síntese a cerca de 700C, não havendo risco de degradação do material. O teor de particulados atingido é adequado como mostra (Nussbaumer,1999).

Tabela 10: Custos parciais dos materiais selecionados para a confecção de filtros cerâmicos, por tonelada. (Internet: *Minerals and Metals prices*; consultado em: Agosto de 2011)

| Alumina | Mulita (fundida) | Cordieirita |
|----------|------------------|-------------|
| US\$ 598 | US\$ 700 | US\$ 1240 |

Tabela 11: Preços relativos par a filtros tipo Duster, Manga, Cross Flow e precipitador eletrostático (US\$). Padrão para sistemas relativos à $50m^3/h$ de gás de síntese. Custo relativo por m^3/h de gás.

| Filtro tipo Duster | Manga | Cross Flow | Precipitador |
|--------------------|-------|------------|--------------|
| 1300 | 400 | 800 | >7000 |

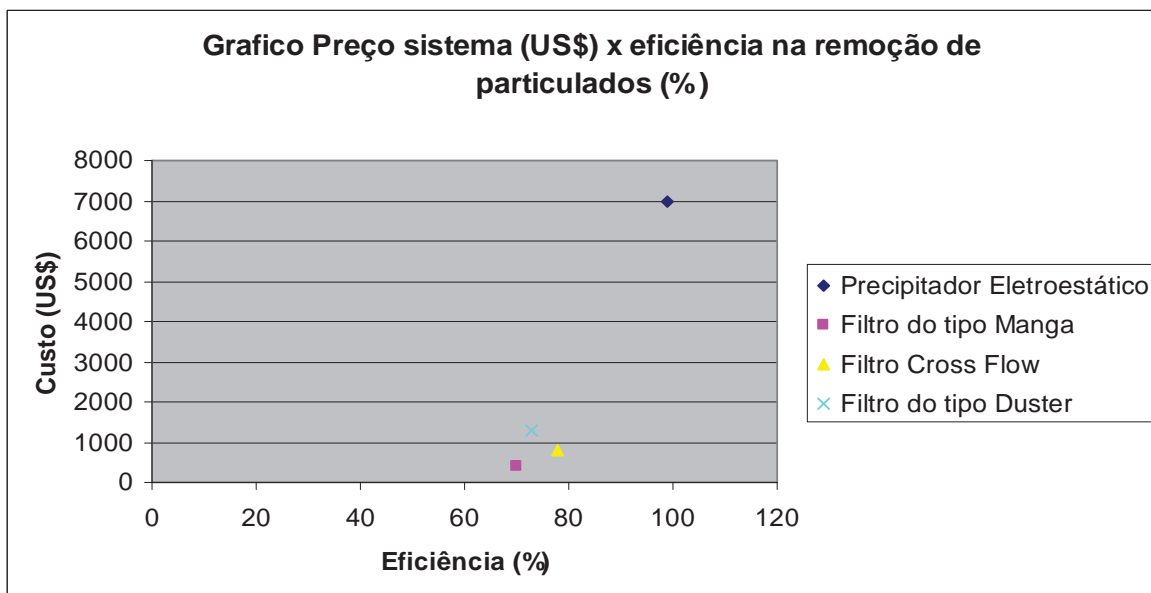


Gráfico 1: Gráfico do custo do sistema empregado vs eficiência na remoção de particulados.

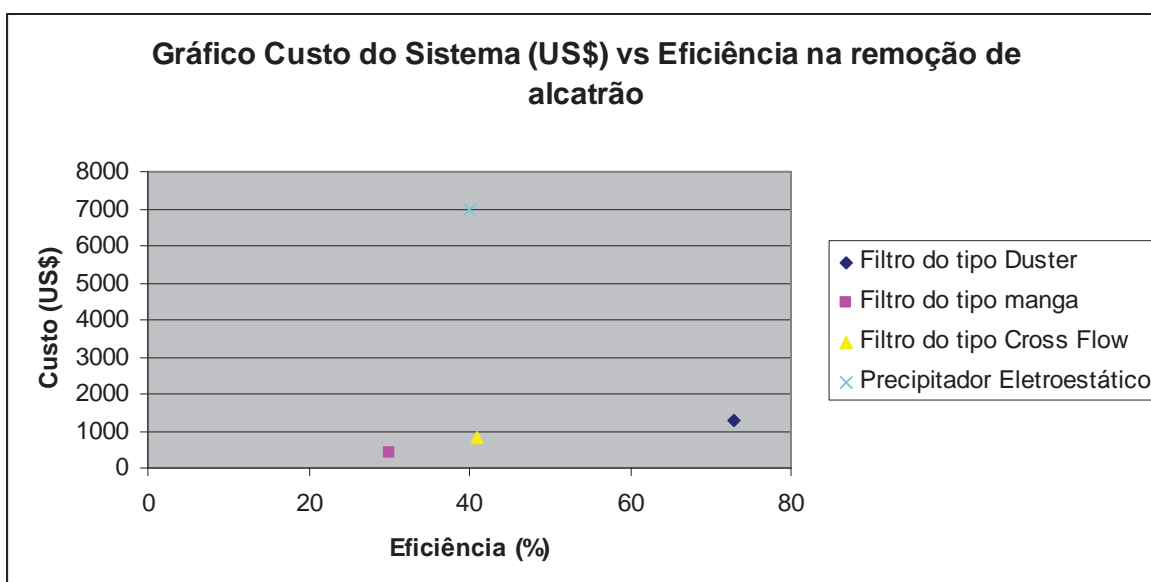


Gráfico 2: Gráfico do custo do sistema empregado vs eficiência na remoção de alcatrão

5. BIOMASSA UTILIZADA NO PROTÓTIPO

Estudos da madeira como combustível, mostram que a combustão direta da madeira é sem dúvida o processo mais simples e econômico de se obter energia (Earl, 1975; citado por Cunha *et al.*, 1989). O rendimento energético de um processo de combustão da madeira depende de sua constituição química, onde os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais variam com a espécie e é de grande importância para a escolha adequada da madeira a ser utilizada.



Figura 12: Cavacos de madeira de eucalipto utilizados no protótipo

Tradicionalmente, enxofre e cinzas são considerados as principais impurezas dos combustíveis. A combustão do enxofre, presente nos combustíveis fósseis, gera o dióxido de enxofre (SO₂), que pode combinar-se com a água formando ácido sulfúrico diluído ou pode se transformar na atmosfera em outro composto potencialmente perigoso.

O uso da madeira para produção de energia apresenta menores problemas de poluição quando comparada aos combustíveis fósseis, tendo em vista que esta possui um baixo teor de enxofre (Cunha *et al.*, 1989). Além disto, o uso da biomassa tem outro aspecto ambiental favorável já que a emissão de CO₂ da queima da biomassa na atmosfera geralmente é compensada pela absorção no plantio da nova biomassa (Ingham, 1999). Estas vantagens tornam interessante o uso da madeira para fins energéticos, necessitando, no entanto de uma caracterização adequada.

Brito & Barrichello (1978), citando Junge (1975), Arola (1976) e Corder (1976), indicaram o poder calorífico, o teor de umidade, a densidade e a análise imediata como

as propriedades mais importantes da madeira para sua utilização como combustível. A Biomassa utilizada nessa pesquisa é o eucalipto.

O poder calorífico define-se como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira. No Sistema Internacional o poder calorífico é expresso em J/g ou kJ/kg, mas pode ser expresso em cal/g ou kcal/kg (Carvalho, 2007).



Figura 13: Pesagem dos cavados de madeira utilizados.

Segundo Earl (1975), citado por Cunha *et al.* (1989), é importante que o teor de umidade da madeira a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível.

O conteúdo de umidade máximo que uma madeira pode ser queimada no forno está em torno de 65 % a 70 % em base úmida. Por existir essa umidade, é inevitável que ocorra uma perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, já que a umidade da madeira evapora e absorve energia em combustão. A quantidade máxima de água que a madeira pode conter para entrar em combustão tem sido calculada em aproximadamente 65 % na base úmida (o resto corresponde ao material sólido). Desta forma, madeira muito úmida, com teor de umidade acima desse limite, necessita calor de origem externa para secar e entrar em combustão (Ince, 1980, citado por Cunha *et al.*, 1989; Jara, 1989).

Os resíduos de madeira são originados desde o corte de árvores nas florestas até a manufatura de produtos derivados, com aproveitamento global da ordem de 30 a 40 %, em metros cúbicos. Em outras palavras, estas atividades podem gerar até 70 % de resíduos de madeira que, até o momento, não estão sendo adequadamente tratados ou aproveitados. As emissões de CO_2 são consideradas quase zero, uma vez que não existe nenhuma contribuição adicional de carbono, por estar em equilíbrio com os absorvidos pelas florestas donde se originam as respectivas biomassas.

Para o presente trabalho escolheu-se utilizar tocos de eucalipto como combustível para a gaseificação devido à sua alta eficiência energética e menor porcentagem de umidade, quando comparados a outros tipos de biomassa, como podemos observar na tabela 12.

Tabela 12: Poder calorífico superior e inferior, teor de água, massa específica aparente, densidade energética das biomassas, taxa de gaseificação e eficiência energética do sistema (Saiki, E. T., Sobrinho, J. C., Silva, J. N, 2004).

| Biomassa | PCS (kJ/kg) | PCI (kJ/kg) | Umidade (% b.u) | Massa específica aparente (kg/ m ³) | Densidade Energética (MJ/ m ³) | Taxa de gaseificação (kg/s) | Eficiência Energética (%) |
|--------------------|----------------|----------------|--------------------|--|--|-----------------------------------|---------------------------------|
| Tocos de eucalipto | 18.789,10 | 17.275,20 | 13,8 | 273,2 | 4.719,70 | 0,040 | 75,60 |
| Restos de serraria | 19.797,40 | 18.268,80 | 15,1 | 315,8 | 5.769,73 | 0,042 | 60,10 |
| Sabugos de milho | 18.351,50 | 16.799,80 | 17,1 | 141,5 | 2.376,74 | 0,051 | 52,80 |
| Cavacos de lenha | 18.240,00 | 16.651,00 | 15,7 | 268,0 | 4.200,41 | 0,041 | 74,90 |



Figura 14: Cavacos de madeira de eucalipto doados pela empresa Nobrecel utilizados no projeto



Figura 15: Cavacos de madeira e ao fundo a localização dos gaseificadores.

5.1 TIPOS DE PARTÍCULAS E MOLÉCULAS PRODUZIDAS NA GASEIFICAÇÃO

Os seguintes componentes podem ser esperados nos gases de escape do motor:

- dióxido de carbono (CO_2);
- oxigênio (O_2);
- monóxido de carbono (CO);
- hidrocarbonetos orgânicos (C_xH_y);
- óxidos de azoto (NO_x);
- nitrogênio (N_2);
- vapor de água (H_2O);
- elementos traços de substâncias orgânicas e inorgânicas;

Produtos de combustão incompleta ou de deslizamento de produtores de gás, (principalmente CO e C_xH_y) a alta temperatura de combustão do combustível ou de azotos (NO_x) exigem a operação de sistemas de tratamento secundário em relação ao estipulado, pois os limites de emissão são acima das medidas específicas padronizadas de emissão, e são insuficientes para minimizar os poluentes no gases do motor.

Os tratamentos que utilizam de várias técnicas que envolvem catalisadores ou técnicas de pós-combustão, que garantem o cumprimento dos limites de emissão, são principalmente utilizados. A experiência de longo prazo sobre a eficiência em serviço da vida de catalisadores atualmente não se encontra disponível. A vida útil é influenciada substancialmente por partículas alocadas no catalisador, por exemplo, compostos de metais pesados, compostos alcalinos, que em parte, reduzem a atividade do revestimento catalítico muito rapidamente.

Pontos importantes que devem ser considerados:

- Manter uma evacuação segura e confiável dos gases de escape;

- Manter os componentes da planta sob permanente verificação;
- Respeitar os intervalos de manutenção periódica das plantas;
- Observar o problema das emissões;
- Observar medidas de segurança contra as superfícies quentes na área de tratamento secundário de gases de escape;
- Obedecer rigorosamente o cumprimento dos valores de limite de emissão dos gases de escape;
- Analisar os riscos para a saúde (o perigo de contaminação com resíduos e condensados);
- Analisar o perigo de incêndio e explosão (sistemas de controle do motor, com controle adequado do fluxo de gás e as funções de paralisação de emergência);

5.2 QUANTIDADE DE PARTÍCULAS PRODUZIDAS POR CADA MEIO DE FILTRAÇÃO E DE GASEIFICAÇÃO

De acordo com Hasler e Nussbaumer (1999), o gás produzido a partir da gaseificação contém impurezas como voláteis, alcatrão, amônia e ácido cianídrico, dependendo do tipo de tecnologia empregada, que podem causar graves problemas durante a operação dos equipamentos que utilizam esse gás.

A concentração de contaminantes varia de acordo com o gaseificador utilizado, como mostrado na tabela 13. O gás deve ser limpo antes de ser aplicado em sistema de geração de potência (motores de combustão interna, turbinas, entre outros), e deve atender a padrões de qualidade ambiental. A escolha do sistema de filtragem dos gases depende de uma série de fatores, como a eficiência, o nível de emissão desejado, o custo operacional e de investimento, o espaço disponível, a temperatura, a característica do gás, o tamanho das partículas de biomassa, entre outros, conforme indicado pelas tabelas 13, 14 e 15 logo abaixo:

Tabela 13 – Características do gás produzido no gaseificador, visando sua aplicação em turbinas a gás.
(Nussbaumer *et al.*,1999)

| Tipo de Gaseificador | Agente Gaseificador | H2 | CO | CO2 | CH4 | N2 | PCS (MJ/Nm) | Teor de Alcatrão (%) | Teor de Particulados (%) |
|-----------------------------|----------------------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|--------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Leito Fluidizado | ar | 9 | 14 | 20 | 7 | 50 | 5,4 | Médio | Pobre |
| Contracorrente | ar | 11 | 24 | 9 | 3 | 53 | 5,5 | Pobre | Bom |
| Concorrente | ar | 17 | 21 | 13 | 1 | 48 | 5,7 | Bom | Médio |
| Concorrente | O2 | 32 | 48 | 15 | 2 | 3 | 10,4 | Bom | Bom |

Tabela 14 – Redução do teor de alcatrão e particulados, utilizando diferentes sistemas de filtragem.
(Nussbaumer *et al.*,1999)

| Sistema de Limpeza | T(C) | Redução do teor de Particulados (%) | Redução do Teor de Particulados (%) |
|--------------------------------------|-------------|--|--|
| Filtro de areia | 10 à 20 | 70 à 99 | 50 à 97 |
| Torre de lavagem | 50 à 60 | 60 à 98 | 10 à 25 |
| Lavador Venturi | - | - | 50 à 90 |
| Precipitador Eletrostático | 40 á 60 | >99 | 0 à 60 |
| Filtro de mangas | 130 | 70 á 95 | 0 à 50 |
| Absorvente de alcatrão de leito fixo | 80 | - | 50 |
| Craqueamento catalítico | 900 | - | >95 |

Tabela 15: Qualidade do gás requerida para diferentes aplicações tecnológicas. (Nussbaumer *et al.*,1999)

| Teor de Compostos | Motor de Combustão Interna (mg/N.m ³) | Turbina a gás (mg/N.m ³) | Células de combustível (mg/N.m ³) |
|-------------------|---|--------------------------------------|---|
| Particulados | <50 | <30 | - |
| Alcatrão | <100 | - | <1 |
| Metais Alcalinos | - | <0,25 | - |
| NH3 | <55 | <0,25 | - |

6. O GASEIFICADOR DOWNDRAFT

No reator *downdraft* o ar e o combustível fluem no mesmo sentido, de cima para baixo, e o gás é extraído na parte inferior, como mostra a Figura 16. Nesta configuração os voláteis passam necessariamente pela zona de redução sendo transformados em compostos de menor peso molecular eliminando até 99,9% do alcatrão liberado pelo combustível (Coronado, 2007).

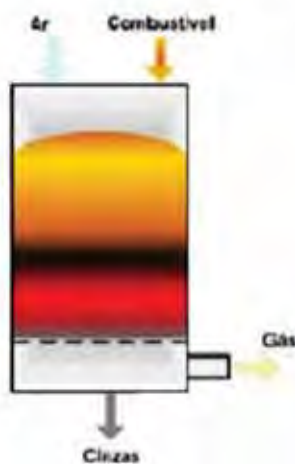


Figura 16: Reator Downdraft

Como o ar introduzido no reator encontra primeiro a biomassa não queimada, a temperatura máxima ocorrerá na fase gasosa, na região de pirólise flamejante. O material sólido localizado logo acima da região de pirólise sofre um pré-aquecimento (zona de secagem) e secagem, principalmente pela troca de calor por radiação com a

zona de pirólise flamejante. Materiais com umidade elevada apresentam dificuldades de aquecimento e secagem devido à evaporação da água contida no interior das partículas, que retarda ou impede a formação da região de pirólise, levando à formação de gases com alto teor de alcatrão. Este tipo de reator não opera adequadamente utilizando-se biomassa com umidade superior a 20%.

Conforme a biomassa atinge uma determinada temperatura, superior a 200°C, combustíveis voláteis são liberados e sofrem oxidação em volta das partículas. As partículas queimam de forma mais intensa devido às trocas de calor com a própria chama, até o esgotamento de toda matéria volátil, restando apenas uma pequena percentagem de carvão vegetal.

O gaseificador de leito fixo tipo “*downdraft*” é utilizado, devido a sua capacidade de produzir menos alcatrão no gás combustível (Mendis et al., 1989), além do fato de apresentar distintas vantagens. Destes modelos tipo *downdraft*, se escolheu aquele de tipo “garganta”. (Bilbao e Fernández, 1988), (Arauzo, 1999). Como a biomassa depende do fluxo de ar introduzido e do sistema de remoção de resíduos, as influências de ambas variáveis são consideradas para o estudo do sistema (Jenkins e Goss, 1980).

O gaseificador é constituído dos seguintes componentes:

- Corpo do gaseificador;
- Grelha que sustenta o leito de biomassa e regula a eliminação das cinzas;
- Uma tampa superior onde se instala o sistema de válvulas para o ingresso da biomassa;
- Um agitador que evita a formação de ar no leito de biomassa;
- Uma região inferior de recolhimento de resíduos sólidos;
- Um tubo de ar ao redor da região da garganta para a injeção do mesmo;

A grelha é construída por dois discos de aço refratário com diâmetros decrescentes “*Closed – Grate Design*” (Garcia *et al.*, 1994). Os diferentes discos (8 mm de espessura) são colocados excêntricamente em relação ao eixo do mesmo; as paredes laterais da grelha são de aço refratário de 3 mm de espessura e com buracos de aproximadamente 5 mm de diâmetro. A grelha será acionada por um motor elétrico, com 90 RPM de velocidade angular, acoplado ao correspondente redutor, terminando num conjunto de engrenagem que se conecta ao eixo da grelha. O ingresso do ar é

realizado por um tubo que se origina no topo do gaseificador e se finaliza na região da garganta, onde acontecerá a combustão da madeira (Coronado, 2007).

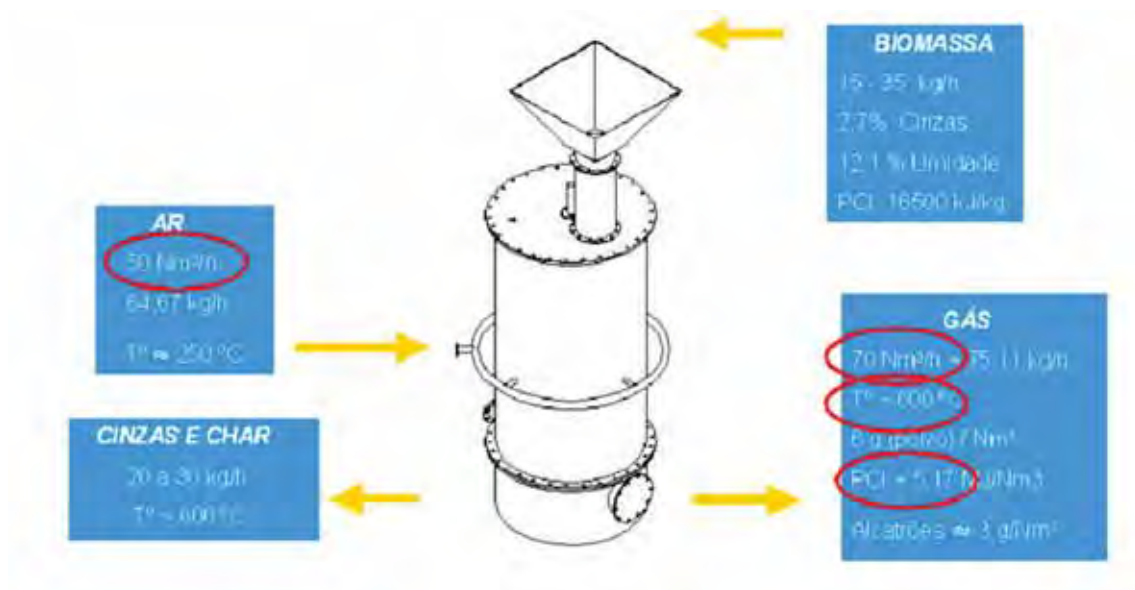


Figura 17: Dimensionamento e funcionamento do gaseificador. (Coronado, 2007)

A metodologia utilizada para o dimensionamento deste gaseificador está baseada na experiência do Grupo de Processos Termoquímicos (G.P.T.) do Departamento de Engenharia Química e Tecnologias do Meio Ambiente (I.Q.T.M.A.) da Universidade de Zaragoza. O grupo conta com uma grande experiência na construção de gaseificadores Downdraft, utilizando o ar como agente oxidante. O Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos (GOSE) do campus da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá mantém o contato direto com este grupo através de intercâmbio direto de pesquisadores em nível de pós-graduação.

A quantidade de gás de madeira produzida pelo gaseificador é dada pelo gráfico obtido pelo G.P.T. O gráfico fornece a relação de fluxo de ar necessário para a gaseificação, a quantidade de gás e de sólidos produzidos para determinada quantidade de biomassa queimada (Gráfico 3).

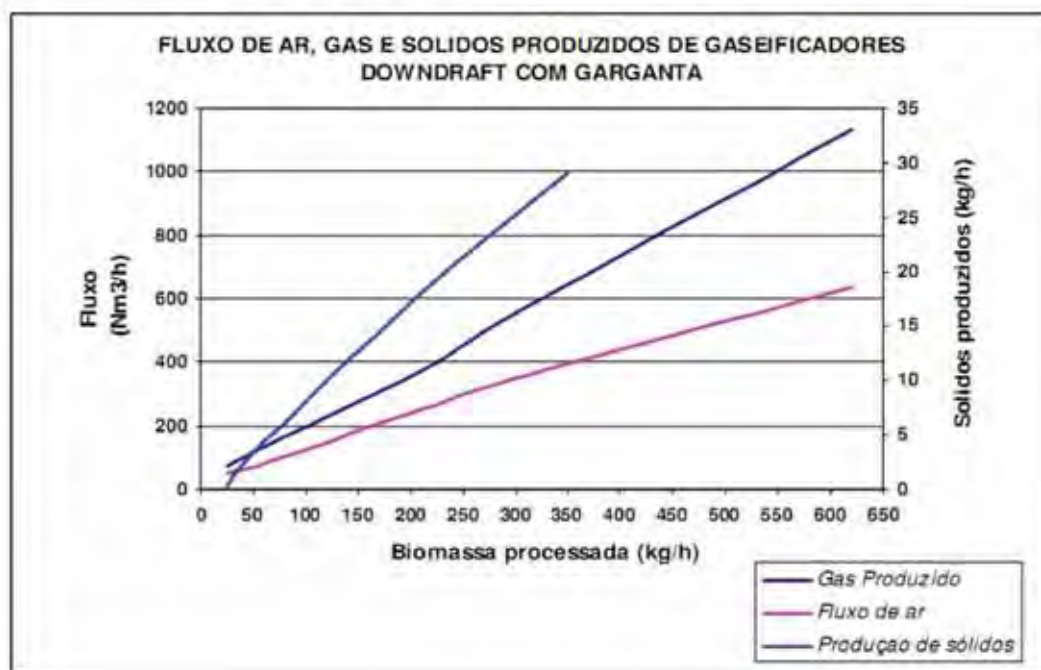


Gráfico 3: Fluxo de ar produzido em função da biomassa processada em um gaseificador tipo Downdraft com garganta.

Para o estudo em questão será estudado para a queima de 25kg/h de biomassa proveniente de cavacos de eucalipto, cuja densidade é 652kg/m³. Para a queima de 25kg/h de biomassa, temos aproximadamente a produção de 40,7m³/h de gás.



Figuras 18: Parte inferior, detalhe.



Fig 19: O gaseificador, vista geral.



Figuras 20 e 21: Detalhe para a parte interna do gaseificador e detalhe para a lã isolante a ser inserida no corpo do gaseificador.

A estrutura do gaseificador construído é composta de três diferentes camadas de materiais, os quais são a parte fundamental da presente pesquisa; a primeira camada exterior será de aço carbono de 3 mm de espessura que é a estrutura do gaseificador.

Uma segunda camada é feita de material isolante (lã isolante) de 20 mm de espessura, conforme figura 21, e tem a função de absorver possíveis dilatações térmicas. O material utilizado no projeto é a manta *Kaowool Spun* 1260 fornecido pela empresa Morganite Brasil S/A. A manta *Kaowool Spun* é produzida com óxidos de alumínio e silício de altíssima pureza, utilizando o processo "*spinning*". A qualidade da fibra spun resultante deste processo propicia uma melhor resistência à tração e ao manuseio, melhor que qualquer outra manta já produzida pela Morganite Brasil S/A. A manta *Kaowool Spun* está disponível em uma larga variedade de densidades e tamanhos, possui excelente estabilidade a altas temperaturas o que permite uma diversidade de aplicações como revestimento e isolamento térmico de fornos, fornalhas e outros equipamentos que possuam alta temperatura.

Na terceira camada, o material escolhido para o corpo do gaseificador do projeto é o concreto *Castable 52* (M002-00) fornecido pela empresa *Thermal Ceramics*; este concreto convencional silico-aluminoso é indicado para revestimento de trabalho e reparos, devido à facilidade de instalação, pois não requer equipamentos especiais.

Esse material possui grande taxa de retenção de calor, e alta resistência à temperatura, sendo sua operação possível a valores de até 1300°C, o que a torna

adequada para o uso no projeto. Ele encontra-se no interior do gaseificador, em uma camada de cimento refratário de 110 mm de espessura que realizará o isolamento térmico como mostra a figura 20; essa camada será utilizada para a construção do interior do corpo para a região oxidação conhecida como “garganta”.

7. METODOLOGIA

Para o estudo em questão será estudado para a queima de 25 kg/h de biomassa (eucalipto), cuja densidade é 652 kg/m^3 . Para a queima de 25 kg/h de biomassa, temos aproximadamente a produção de $70 \text{ m}^3/\text{h}$ de gás.

O sistema de gaseificação é constituído de um gaseificador com uma capacidade de 20 kg/h a 30 kg/h de alimentação de biomassa; um motor de combustão interna do tipo GM – Corsa 1.0L acoplado a este temos um gerador elétrico funcionando a uma frequência de 60 kHz, 4 pólos e potência de 10 kW ~ 20 kW; um trocador de calor (TC1) água/gás dimensionado para uma vazão de água equivalente a 120 kg/h, entrando a 25°C e saindo a 65°C ; um segundo trocador de calor (TC2) água/água projetado para uma vazão de 1109 kg/h, também água entrando a 25°C e saindo a 65°C ; e um sistema de refrigeração por absorção (SRA) ROBUR cuja capacidade é de 5TR (figura 16).

Na análise técnica serão calculadas as eficiências de geração de energia elétrica, de geração de água quente e de geração de água fria, conseguindo-se dessa forma a eficiência global do sistema. Conhecendo-se a vazão e o poder calorífico do combustível (gás de biomassa) poderá ser calculada a potência suprida pelo combustível. Por outro lado, conhecendo-se as eficiências dos trocadores de calor, serão calculados: a vazão de água quente produzida, vazão dos gases de exaustão e vazão de água das jaquetas do motor. No sistema de refrigeração por absorção será calculado o coeficiente de *performance* (COP) e a vazão de água fria produzida.

Na análise econômica, tem-se como objetivo calcular o custo da energia elétrica produzida [US\$/kWh]. Para tanto será necessário calcular o preço do combustível com o qual é alimentado o motor. Por último será feito uma análise gráfica do período de amortização dos equipamentos para diferentes taxas anuais.

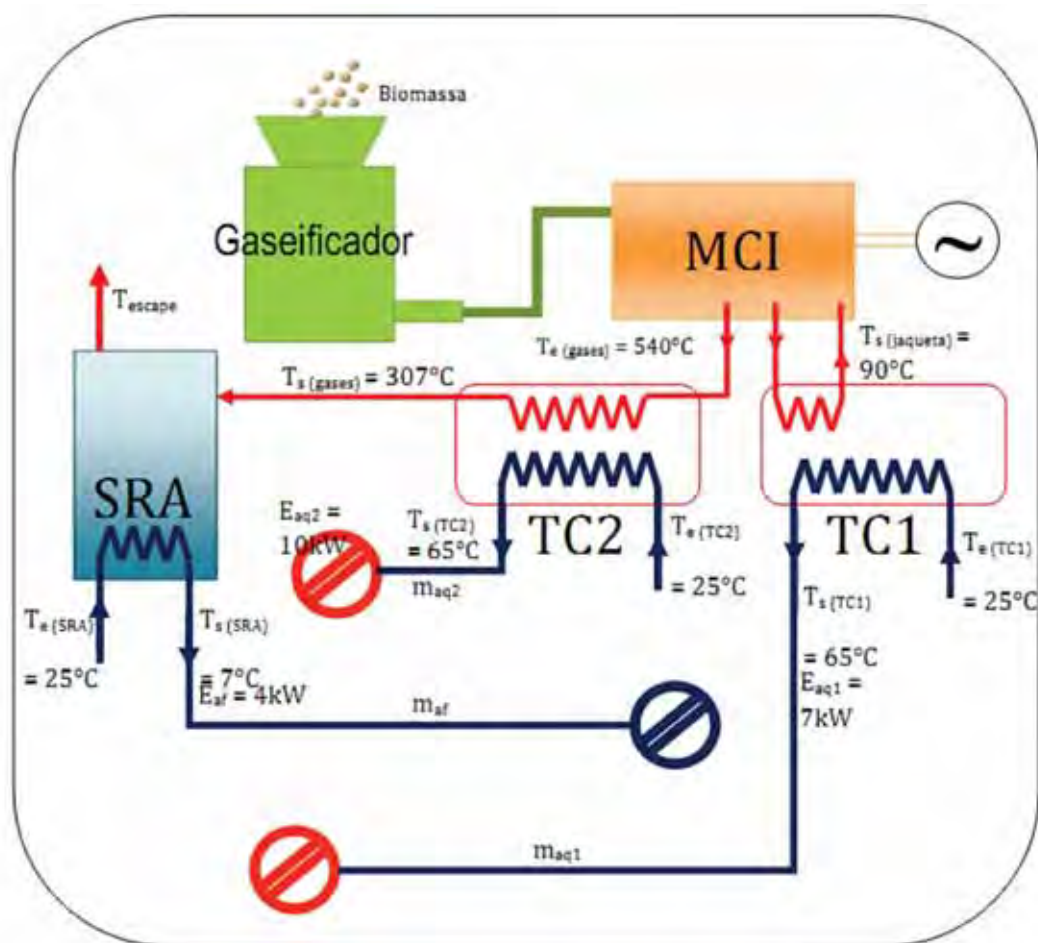


Figura 22 – Fluxo de gás de síntese produzido em função da biomassa processada em um gaseificador tipo downdraft com garganta.

7.1 ANÁLISE TÉCNICA

O sistema de gaseificação é constituído de um gaseificador com uma capacidade de 20 kg/h a 30 kg/h de alimentação de biomassa; um motor de combustão interna do tipo GM – Corsa 1.0L acoplado a este temos um gerador elétrico funcionando a uma frequência de 60 kHz, 4 pólos e potência de 10 kW ~ 20 kW; um trocador de calor (TC1) água/gás dimensionado para uma vazão de água equivalente a 120 kg/h, entrando a 25°C e saindo a 65°C; um segundo trocador de calor (TC2) água/água projetado para uma vazão de 1109 kg/h, também água entrando a 25°C e saindo a 65°C; e um sistema de refrigeração por absorção (SRA) ROBUR cuja capacidade é de 5TR. Para a análise técnica são utilizadas as seguintes equações:

$$\eta_{GE} = \frac{E_p}{E_{comb}} \quad (1) \quad \eta_{TC1} = \frac{E_{aq1}}{E_{Ajaqueta}} \quad (5)$$

$$\eta_{aq} = \frac{E_{aq1} + E_{aq2}}{E_{comb}} \quad (2) \quad \eta_{TC2} = \frac{E_{aq2}}{E_{gas}} \quad (6)$$

$$\eta_{af} = \frac{E_{af}}{E_{comb}} \quad (3) \quad COP = \frac{E_{af}}{E_{gas(SRA)}} \quad (7)$$

$$\eta_{Global} = \frac{E_p + E_{aq1} + E_{aq2} + E_{af}}{E_{comb}} \quad (4) \quad E_{comb} = m_{syn} \times PCI_{syn} \quad (8)$$

$$E_{aq1} = m_{aq1} \times cp_{\acute{a}gua} \times (T_{s,TC1} - T_{1,TC1}) \quad (9)$$

$$E_{aq2} = m_{aq2} \times cp_{\acute{a}gua} \times (T_{s,TC2} - T_{1,TC2}) \quad (10)$$

$$E_{Ajaqueta} = m_{Ajaqueta} \times cp_{\acute{a}gua} \times (T_{s,jaq} - T_{1,jaq}) \quad (11)$$

$$E_{g\acute{a}s} = m_{g\acute{a}s} \times cp_{g\acute{a}s} \times (T_{s,TC2} - T_{1,TC2}) \quad (12)$$

$$E_{g\acute{a}s(SRA)} = m_{g\acute{a}s} \times cp_{g\acute{a}s(SRA)} \times (T_{s,SRA} - T_{1,SRA}) \quad (13)$$

$$E_{af} = m_{af} \times cp_{\acute{a}gua} \times (T_{s,SRA} - T_{1,SRA}) \quad (14)$$

Utilizando as equações (1), (2) e (3), são calculadas as eficiências de geração de energia elétrica, eficiência de geração da água quente e eficiência de geração de água fria respectivamente. Utilizando a equação (4) calcula-se a eficiência global do sistema. Para determinar a potência suprida pelo combustível se utiliza a equação (8) e mediante as equações de eficiência energética dos trocadores de calor do sistema, das equações (5) e (6) são calculadas a energia da água da jaqueta do motor e a energia dos gases de exaustão do motor.

Utilizando as equações (9) e (10), podem-se calcular as vazões da água quente gerada de ambos trocadores de calor. Utilizando as equações (11) e (12) são calculadas as vazões dos gases de exaustão e vazão da água da jaqueta do motor. Com relação ao sistema de refrigeração por absorção (SRA), foi calculada a energia dos gases de exaustão na saída do SRA utilizando a equação (13) e com esse valor é calculado o coeficiente de performance do sistema (COP) utilizando a equação (7). Finalmente mediante a equação (14) é calculada a vazão de água fria gerada.

7.1.1 Eficiência de geração de energia elétrica (η_{GE})

A eficiência de geração de energia elétrica é dada pela razão entre a energia produzida (EP) pelo gerador e a energia fornecida, que corresponde a energia do combustível (EComb). A energia do combustível por sua vez (equação 8), é dada pelo produto entre a vazão de gás produzido (msyn) e seu poder calorífico inferior (PCI_{syn}). Conforme equação (1), a eficiência de geração de energia elétrica é dada por:

$$E_{Comb} = 0,01389 Nm^3 / s \times 5000 kJ / Nm^3 = 69,4 kW$$

$$\eta_{ge} = \frac{15 kW}{69,4 kW} = 0,216 = 21,6\%$$

7.1.2 Eficiência de geração de água quente (η_{aq})

A eficiência de geração de água quente é dada pela razão da energia da água quente gerada pela energia do combustível, e calculada pela equação (2)

$$\eta_{aq} = \frac{7 kW + 10 kW}{69,4 kW} = 0,245 = 24,5\%$$

7.1.3 Eficiência de geração de água fria (η_{af})

A eficiência de geração de água fria é dada pela razão da energia da água fria gerada pela energia do combustível, e calculada pela equação (3).

$$\eta_{af} = \frac{4 kW}{69,4 kW} = 0,0576 = 5,8\%$$

7.1.4 Eficiência global de geração (η_{Global})

A eficiência global de geração é dada pela soma das eficiências parciais ou pela razão da somatória das energias produzidas e energia do combustível. Através da equação (4).

$$\eta_{Global} = \frac{15kW + (7kW + 10kW)}{69,4kW} = 0,518 = 51,8\%$$

7.1.5 Determinação da vazão de água quente gerada no TC1 (m_{aq1})

Conhecendo a energia da água quente no trocador TC1, as temperaturas de entrada e saída e adotando o cp água 4,186 (kJ/kg.K), podemos determinar a vazão da água através da equação (9).

$$-7kW = m_{aq1} \times 4,186kJ / kg \cdot K \times (25 - 65) \rightarrow m_{aq1} = 0,042kg / s$$

7.1.6 Determinação da vazão de água quente gerada no TC2 (m_{aq2})

Analogicamente à equação 9, conhecendo a energia da água quente no trocador TC2, as temperaturas de entrada e saída e adotando o cp água 4,186 [kJ/kg.K], pode-se determinar a vazão da água através da equação (10).

$$-10kW = m_{aq1} \times 4,186kJ / kg \cdot K \times (25 - 65) \rightarrow m_{aq1} = 0,06kg / s$$

7.1.7 Determinação da energia da água da jaqueta (EAJaqueta)

Conhecendo a eficiência do trocador de calor 1 (70%), pode-se determinar a energia da água da jaqueta através da equação (5).

$$0,7 = \frac{7kW}{E_{aJaqueta}} = E_{aJaqueta} = \frac{7kW}{0,70} = 10kW$$

7.1.8 Determinação da vazão da água da jaqueta (mAJaqueta)

Conhecendo agora a energia da água da jaqueta, o cpágua e as temperaturas de entrada e saída na jaqueta, podemos determinar a vazão de água através da equação 11.

$$-10kW = m_{Ajaqueta} \times 4,186kJ / kg \cdot K \times (84 - 90) \rightarrow m_{aq1} = 0,04kg / s$$

7.1.9 Determinação da energia dos gases de exaustão do motor (Egás)

Conhecendo a eficiência do trocador de calor 2 (70%), analogicamente, podemos determinar a energia dos gases de exaustão do motor através da equação (6).

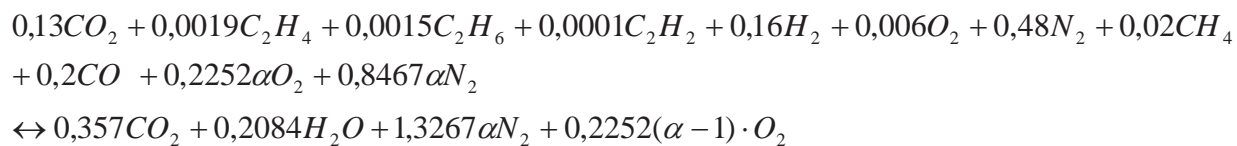
$$0,7 = \frac{10kW}{E_{gás}} \rightarrow E_{gás} = \frac{10kW}{0,70} = 14,3kW$$

7.1.10 Determinação da vazão de gás de exaustão (mgás)

Para a determinação da vazão de gás de exaustão através da equação (12), é necessário primeiramente determinar o calor específico do gás (cpgás).

7.1.10.1 Cálculo do calor específico do gás de biomassa

A composição química em base seca do gás de biomassa procedente do gaseificador tipo downdraft construído e montado no laboratório de motores da faculdade é aproximadamente a seguinte: 16% de H_2 , 20% de CO , 13% de CO_2 , 2% de CH_4 , 0,6% de O_2 , 48% de N_2 , 0,19% de C_2H_4 , 0,15% de C_2H_6 y 0,01 de C_2H_2 . A sua massa molecular é 25,692g/mol e, portanto a sua massa específica é 1,147 kg/Nm³ (Coronado, 2007). A equação de reação no caso de excesso de ar na combustão deste gás é:



Adotando a queima do gás de biomassa (syngas) com 100 % de excesso de ar ($\alpha = 1$), depois do balanço estequiométrico foi determinada a porcentagem em massa dos produtos da combustão deste combustível: 15,558 % CO_2 , 3,715 % H_2O , 73,589% N_2 e 7,138 % de O_2 .

De acordo com (Boehm, 1987) aplicando a porcentagem em massa de cada componente da mistura, é possível compor uma equação para o calor específico dos gases de exaustão em função da temperatura no caso da queima do gás de biomassa (syngas); o gráfico 4 mostra os valores em função da temperatura.

$$c_{p_{gás}} = 0,976712 + \frac{1,02047 \times T}{10^4} + \frac{2,4370 \times T^2}{10^7} - \frac{1,1466 \times T^3}{10^{10}}$$

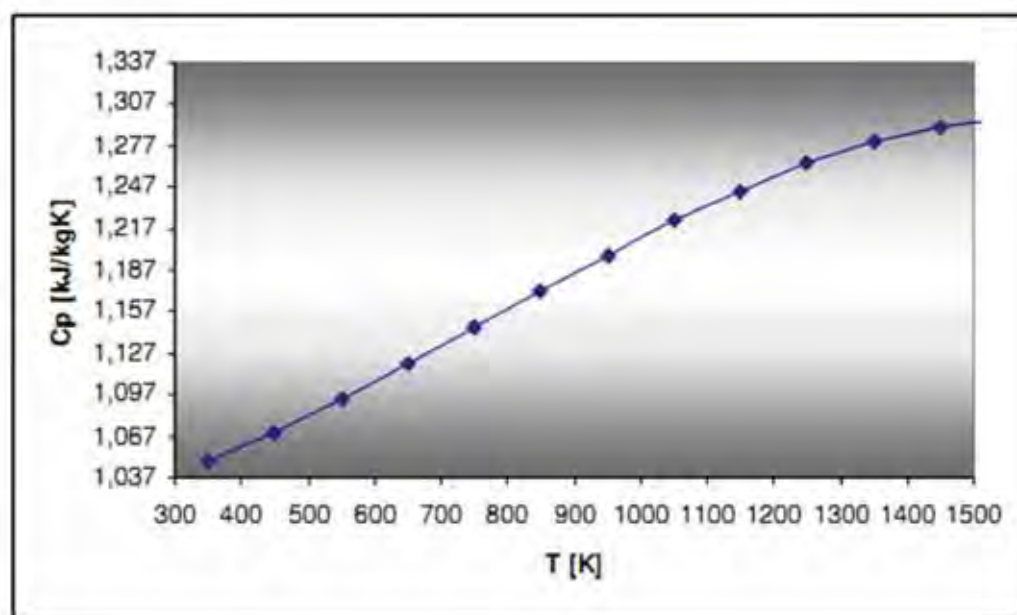


Gráfico 4: Calor específico dos gases de exaustão do motor em função da temperatura dos gases.

Portanto, temos um $c_{pgás}$ a uma temperatura de 540°C correspondente a 1,084826, pelo método de Boehm, a energia dos gases calculada no item anterior igual a 14,3 kW e as temperaturas de entrada e saída dos gases de exaustão no trocador de calor, podemos determinar a vazão dos gases de exaustão.

$$-14,3\text{kW} = m_{GÁS} \times 1,08482\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K} \times (307 - 540) \rightarrow m_{gás} = 0,057\text{kg} / \text{s}$$

7.1.11 Determinação da energia dos gases de exaustão dos gases no SRA (E_{gás(SRA)})

Conhecendo a vazão de gases de exaustão, o $c_{pgás}$ para a temperatura de 307°C (1,027692 kJ/kg.s) e as temperaturas de entrada e saída no sistema de refrigeração por absorção, podemos determinar a energia de exaustão dos gases no SRA através da equação (13).

$$E_{gás(SRA)} = 0,057\text{kg} / \text{s} \times 1,027692\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K} \times (150 - 307) \rightarrow E_{gás(SRA)} = 9,2\text{kW}$$

7.1.12 Determinação do coeficiente de performance (COP)

Determinada a energia dos gases no SRA, podemos agora calcular o seu coeficiente de performance através da equação (7):

$$COP = \frac{4\text{kW}}{9,2\text{kW}} = 0,435 = 43,5\%$$

7.1.13 Determinação da vazão de água fria (maf)

Conhecida a energia de água fria, $c_{págua}$ e as temperaturas de entrada e saída do sistema de refrigeração por absorção, consegue-se determinar a vazão de água fria gerada utilizando a equação (14):

$$-4\text{kW} = m_{af} \times 4,186\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K} \times (7 - 25) \rightarrow m_{af} = 0,053\text{kg} / \text{s}$$

7.2 ANÁLISE ECONÔMICA

O objetivo principal na análise econômica é a determinação do custo da energia elétrica produzida a partir do gás produzido pela biomassa, assim como o custo da água quente e água fria e o período de amortização a fim de avaliar sua viabilidade econômica.

Para tanto, será necessário calcular inicialmente o custo do combustível utilizado, no caso, o custo do gás produzido a partir da biomassa e também, fazer a estimativa dos investimentos no sistema de gaseificação, no sistema motor-gerador. Para tanto, temos as seguintes equações:

$$C_{comb} = \frac{I_{gaseif} \times f}{H \times E_{comb}} + \frac{C_{mad} \times E_{mad}}{E_{comb}} + CM_{gaseif} \quad (15)$$

$$C_{EL} = \frac{I_{mot.ger} \times f}{H \times E_P} + \frac{C_{comb} \times FP_E}{E_P} + CM_{mot.ger} \quad (17)$$

$$C_{aq1} = \frac{I_{TC1} \times f}{H \times E_{aq1}} + \frac{C_{comb} \times FP_{aq1}}{E_{aq1}} + CM_{TC1} \quad (18)$$

$$C_{aq2} = \frac{I_{TC2} \times f}{H \times E_{aq2}} + \frac{C_{comb} \times FP_{aq2}}{E_{aq2}} + CM_{TC2} \quad (19)$$

$$C_{af} = \frac{I_{SRA} \times f}{H \times E_{af}} + \frac{C_{comb} \times FP_{aq2}}{E_{aq2}} + CM_{TC2} \quad (20) \quad C = Cr \times \left(\frac{s}{s-r} \right)^n \quad (16)$$

$$FP_E = \frac{E_P}{E_P + E_{aq1} + E_{aq2} + E_{af}} \quad (21) \quad FP_{af} = \frac{E_{af}}{E_P + E_{aq1} + E_{aq2} + E_{af}} \quad (24)$$

$$FP_{aq1} = \frac{E_{aq1}}{E_P + E_{aq1} + E_{aq2} + E_{af}} \quad (22) \quad f = \frac{q^k \times (q-1)}{q^k - 1} \quad (25)$$

$$FP_{aq2} = \frac{E_{aq2}}{E_P + E_{aq1} + E_{aq2} + E_{af}} \quad (23) \quad q = 1 + \frac{r}{100} \quad (26)$$

7.2.1 Determinação do custo do combustível (Ccomb)

O custo de produção para o gás está relacionado com o capital investido para a construção do gaseificador, custo da madeira e outros custos relacionados tais como custo de operação e manutenção.

A biomassa gaseificada é o eucalipto, cuja densidade é de aproximadamente 652 kg/m³ (Nogueira). Será considerado o preço da biomassa como 42 US\$/m³, apesar de que poderia considerá-lo nulo, visto que a sua intenção é justamente esta. Entretanto, tendo o custo de transporte e serviços, será estipulado tal valor. Como apresentado anteriormente, o gaseificador será alimentado a uma taxa de 25 kg/h de biomassa, gerando aproximadamente 70 Nm³/h de gás.

As horas trabalhadas no ano serão consideradas 3000 (h/ano), aproximadamente 8 horas ao dia (365 dias no ano). O fator de anuidade (f) é dado pelas equações (24) e (25). Serão calculados os custos do combustível para várias taxas anuais de juros: 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% e k (*pay-back*) variando de 1 a 15 anos.

7.2.1.1 Estimativa do investimento no sistema de gaseificação (Igaseif)

Para a análise econômica, é necessário estimar os valores dos equipamentos envolvidos. Para determinar o investimento no motor de combustão interna será utilizado a técnica de Boehm (1987) e adaptado por Silveira (1999). Seu método consiste da relação entre o custo do equipamento de interesse com o custo de outro equipamento conhecido, de mesma natureza (aplicação), porém, de outra grandeza, relacionados por um fator “m” (figura 23). A relação é dada pela equação (16):

$$C = Cr \times \left(\frac{S}{S_r} \right)^m \quad \text{Equação (16)}$$

C – custo do equipamento para uma grandeza de interesse S;

Cr – custo do equipamento para uma grandeza de referência Sr;

m – fator de incidência que indica a escala de economia.

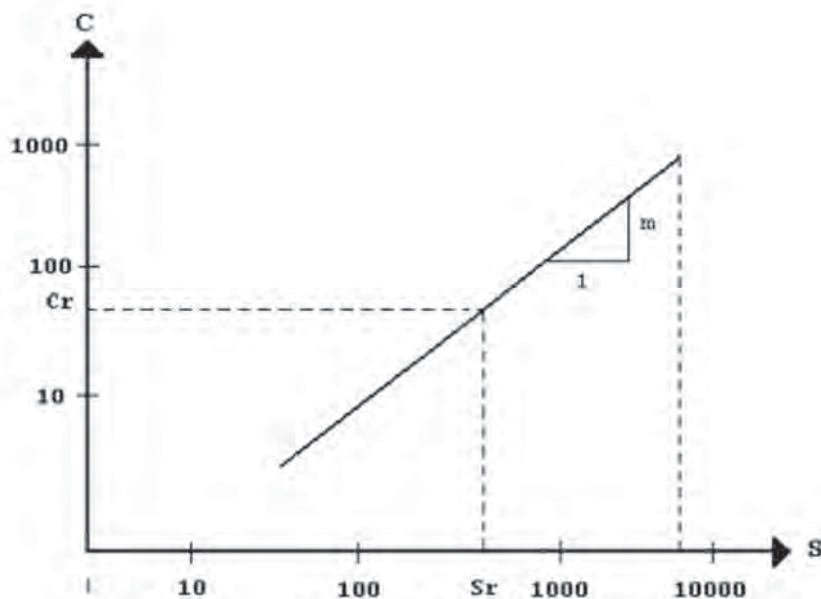


Figura 23: Metodologia para a determinação de custo de equipamento. (Boehm,1987)

Segundo dados reais fornecidos pelo GPT, para um gaseificador de alimentação de 50 kg/h de biomassa o custo é de aproximadamente 53800 € e um fator de incidência igual a 0,78. Logo, pode-se obter o custo do gaseificador para uma alimentação de 25 kg/h substituindo os valores na equação (16):

$$C_{gaseif} = 53800 \times \left(\frac{25}{50}\right)^{0,78} = 31331,6 \text{ €}$$

Deste valor irá ser acrescentado ainda um custo correspondente à instrumentação e controle (10 %), custo da obra civil (13 %) e custo de engenharia e projeto (15 %). Estes valores estão apresentados na tabela 16. Convertendo este valor em dólares (um euro correspondendo US\$ 1,488), o valor aproximado do sistema de gaseificação é: $I_{gaseif} = 84000,00$ (US\$).

Tabela 16 – Custos parciais do sistema de gaseificação.

| | CUSTO (Euros €) |
|----------------------------------|-----------------|
| Gaseificador | 31331,6 |
| Instrumentação e Controle | 3133,1 |
| Obra Civil | 4073,1 |
| Engenharia e Projeto | 4699,7 |
| Total | 43237,5 |

Portanto, a equação para o cálculo do custo do combustível é dado em função do fator de anuidade calculado pela equação (25):

$$f = \frac{q^k \times (q-1)}{q^k - 1}$$

Substituindo na equação (15):

$$C_{comb} = \frac{84000[US\$] \times f}{3000[h] \times 69,4[kW]} + 0,02319[US\$/kWh] + 0,02[US\$/kWh]$$

Variando as taxas anuais de juros (r) e o fator de amortização (k), obtemos diferentes valores do fator de anuidade (f) e conseqüentemente diferentes custos do combustível, o qual são representados pelo gráfico 5 e pela tabela 20.

7.2.2 Determinação do custo da eletricidade gerada (Cel)

Tendo o mesmo raciocínio do cálculo para o custo do combustível, para o cálculo do custo de energia elétrica produzida pelo sistema deve-se fazer uma estimativa do investimento do motor-gerador. Para o motor gerador utilizado, tem-se o conhecimento que o seu custo é de aproximadamente US\$ 15000,00.

Os demais dados tais como horas trabalhadas, fator de anuidade, etc, são os mesmos utilizados na análise anterior. O custo de manutenção no caso do motor-gerador é um pouco mais barato que do gaseificador: 0,01 (US\$/kWh). Neste custo, por estar associados os custos de geração de água quente e água fria, deve-se calcular o fator de ponderação de eletricidade dada pela equação (21):

$$FP_e = \frac{15}{15+7+10+4} = 0,4167$$

Então, a equação do custo da eletricidade é também função do fator de anuidade (f) e do custo do combustível para o respectivo fator de anuidade, dado pela equação (17):

$$C_{EL} = \frac{15000[US\$] \times f}{3000[h] \times 15[kW]} + \frac{C_{comb} \times 0,4167}{15[kW]} + 0,01[US\$ / kWh]$$

7.2.3 Determinação do custo da água quente gerado pelo TC1 – água/água (Caq1)

Analogicamente ao cálculo para a eletricidade, calculamos o custo da água quente gerada pelo trocador de calor 1. O investimento no trocador de calor 1 é de aproximadamente US\$ 300,00 e o custo de manutenção é de 0,003 (US\$/kWh).

O fator de ponderação para o trocador de calor 1 é dada pela equação (22):

$$FP_{aq1} = \frac{7}{15 + 7 + 10 + 4} = 0,1944$$

Substituindo os valores na equação (18):

$$C_{aq1} = \frac{300[US\$] \times f}{3000[h] \times 7[kW]} + \frac{C_{comb} \times 0,1944}{7[kW]} + 0,003[US\$ / kWh]$$

7.2.4 Determinação do custo da água quente gerado pelo TC2 – gás/água (Caq2)

Analogicamente ao item anterior, calculamos o custo da água quente gerada pelo trocador de calor 2. O investimento no trocador de calor gás/água é maior que o trocador água/água por sua maior complexidade e é equivalente a aproximadamente US\$ 600,00, já o custo de manutenção é, ligeiramente menor, de 0,002 (US\$/kWh).

O fator de ponderação para o trocador de calor 2 é dada pela equação (23):

$$FP_{aq2} = \frac{10}{15 + 7 + 10 + 4} = 0,2778$$

Então sua equação é dada substituindo os valores na equação (19):

$$C_{aq2} = \frac{600[US\$] \times f}{3000[h] \times 10[kW]} + \frac{C_{comb} \times 0,2778}{10[kW]} + 0,002[US\$ / kWh]$$

7.2.5 Determinação do custo da água fria gerado pelo SRA (Caf)

Analogicamente aos outros custos, calculamos o custo da água fria gerada pelo sistema de refrigeração por absorção (SRA). O investimento no SRA é aproximadamente US\$ 900,00, já o custo de manutenção é de 0,008 (US\$/kWh).

O fator de ponderação para este caso é dada pela equação (24):

$$FP_{af} = \frac{4}{15 + 7 + 10 + 4} = 0,1111$$

Então a sua equação é dada substituindo os valores na equação 20:

$$C_{af} = \frac{900[US\$] \times f}{3000[h] \times 4[kW]} + \frac{C_{comb} \times 0,1111}{4[kW]} + 0,008[US\$ / kWh]$$

8. RESULTADOS

Os resultados obtidos da análise técnica são dados nas tabelas 17, 18 e 19:

Tabela 17: Eficiências do sistema de gaseificação operando sobre a técnica da cogeração

| Eficiência | | Porcentagem |
|-----------------|---|-------------|
| η_{GE} | Eficiência de geração de energia elétrica | 24,5% |
| η_{aq} | Eficiência de geração de água quente | 21,6% |
| η_{af} | Eficiência de geração de água fria | 5,8% |
| η_{Global} | Eficiência global | 51,8% |

Devido ao uso integrado para geração de energia do sistema, obtém-se uma eficiência global relativamente alta comparada aos sistemas de geração de trabalho. A cogeração neste trabalho visa o aproveitamento das perdas do sistema para geração de

energia térmica a partir da produção de eletricidade. Pode-se observar que as eficiências parciais são muito baixas, sendo a de geração de água fria, a menor delas.

As vazões mássicas, obtidas por meio das equações da primeira lei da termodinâmica são dadas na tabela:

Tabela 18: Vazões mássicas envolvidas no sistema de gaseificação.

| Vazão mássica | | [kg/s] |
|----------------|-------------------------------------|--------|
| m_{aq1} | Vazão mássica de água quente no TC1 | 0,042 |
| m_{aq2} | Vazão mássica de água quente no TC2 | 0,060 |
| $m_{AJaqueta}$ | Vazão mássica da água da jaqueta | 0,400 |
| $m_{gás}$ | Vazão mássica dos gases de exaustão | 0,057 |
| m_{af} | Vazão mássica de água fria | 0,053 |

As energias da água na jaqueta do motor, bem como a dos gases de exaustão, também calculadas pela primeira lei da termodinâmica conhecendo as vazões respectivas são apresentadas na tabela:

Tabela 19: Energia gerada no sistema de gaseificação

| Energia | | [kW] |
|----------------|--------------------------------------|------|
| $E_{AJaqueta}$ | Energia da água da jaqueta do motor | 10,0 |
| $E_{gás}$ | Energia dos gases de exaustão | 14,3 |
| $E_{gás(SRA)}$ | Energia dos gases de exaustão no SRA | 9,2 |

Na análise técnica foram calculados os custos do combustível, eletricidade, água quente gerado pelo trocador de calor 1 (água/água), água quente gerado pelo trocador de calor 2 (gás/água), água fria para diferentes taxas anuais e variando o período de amortização.

Os resultados obtidos da análise econômica são apresentados nas tabelas 20, 21, 22, 23 e 24:

Tabela 20: Custo do combustível em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização.

| C_{comb} [US\$/kWh] | | | | | | | |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| k | 2% | 4% | 6% | 8% | 10% | 12% | 14% |
| 1 | 0,45445 | 0,46252 | 0,47058 | 0,47865 | 0,48671 | 0,49477 | 0,50284 |
| 2 | 0,25086 | 0,25697 | 0,26311 | 0,26929 | 0,27551 | 0,28176 | 0,28805 |
| 3 | 0,18300 | 0,18848 | 0,19403 | 0,19965 | 0,20532 | 0,21106 | 0,21686 |
| 4 | 0,14908 | 0,15427 | 0,15955 | 0,16492 | 0,17039 | 0,17594 | 0,18157 |
| 5 | 0,12873 | 0,13376 | 0,13891 | 0,14417 | 0,14955 | 0,15504 | 0,16064 |
| 6 | 0,11517 | 0,12011 | 0,12519 | 0,13041 | 0,13577 | 0,14126 | 0,14688 |
| 7 | 0,10549 | 0,11037 | 0,11542 | 0,12063 | 0,12601 | 0,13154 | 0,13721 |
| 8 | 0,09823 | 0,10308 | 0,10812 | 0,11335 | 0,11877 | 0,12436 | 0,13011 |
| 9 | 0,09259 | 0,09742 | 0,10247 | 0,10773 | 0,11320 | 0,11886 | 0,12470 |
| 10 | 0,08808 | 0,09290 | 0,09797 | 0,10328 | 0,10881 | 0,11455 | 0,12049 |
| 11 | 0,08439 | 0,08922 | 0,09431 | 0,09967 | 0,10527 | 0,11110 | 0,11713 |
| 12 | 0,08132 | 0,08615 | 0,09128 | 0,09669 | 0,10237 | 0,10828 | 0,11442 |
| 13 | 0,07872 | 0,08357 | 0,08874 | 0,09420 | 0,09995 | 0,10596 | 0,11220 |
| 14 | 0,07650 | 0,08136 | 0,08657 | 0,09210 | 0,09792 | 0,10402 | 0,11037 |
| 15 | 0,07457 | 0,07945 | 0,08470 | 0,09030 | 0,09620 | 0,10239 | 0,10883 |

Tabela 21: Custo da eletricidade em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização

| C_{el} [US\$/kWh] | | | | | | | |
|---------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| k | 2% | 4% | 6% | 8% | 10% | 12% | 14% |
| 1 | 0,36262 | 0,36951 | 0,37641 | 0,38330 | 0,39019 | 0,39708 | 0,40397 |
| 2 | 0,18865 | 0,19387 | 0,19912 | 0,20440 | 0,20972 | 0,21506 | 0,22043 |
| 3 | 0,13067 | 0,13535 | 0,14009 | 0,14489 | 0,14974 | 0,15465 | 0,15960 |
| 4 | 0,10168 | 0,10612 | 0,11063 | 0,11522 | 0,11989 | 0,12463 | 0,12945 |
| 5 | 0,08430 | 0,08859 | 0,09299 | 0,09749 | 0,10209 | 0,10678 | 0,11156 |
| 6 | 0,07271 | 0,07692 | 0,08126 | 0,08573 | 0,09031 | 0,09500 | 0,09980 |
| 7 | 0,06443 | 0,06860 | 0,07292 | 0,07738 | 0,08197 | 0,08669 | 0,09154 |
| 8 | 0,05823 | 0,06237 | 0,06668 | 0,07115 | 0,07578 | 0,08056 | 0,08547 |
| 9 | 0,05341 | 0,05754 | 0,06185 | 0,06635 | 0,07102 | 0,07586 | 0,08085 |
| 10 | 0,04956 | 0,05368 | 0,05801 | 0,06255 | 0,06727 | 0,07218 | 0,07725 |
| 11 | 0,04640 | 0,05053 | 0,05488 | 0,05946 | 0,06425 | 0,06922 | 0,07439 |
| 12 | 0,04378 | 0,04791 | 0,05229 | 0,05692 | 0,06176 | 0,06682 | 0,07207 |
| 13 | 0,04156 | 0,04570 | 0,05012 | 0,05479 | 0,05970 | 0,06484 | 0,07017 |
| 14 | 0,03966 | 0,04382 | 0,04827 | 0,05299 | 0,05797 | 0,06318 | 0,06860 |
| 15 | 0,03801 | 0,04219 | 0,04667 | 0,05145 | 0,05650 | 0,06179 | 0,06729 |

Tabela 22: Custo da geração de água quente pelo TC1 em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização.

| C_{aq1} [US\$/kWh] | | | | | | | |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| k | 2% | 4% | 6% | 8% | 10% | 12% | 14% |
| 1 | 0,03020 | 0,03070 | 0,03121 | 0,03172 | 0,03223 | 0,03274 | 0,03325 |
| 2 | 0,01733 | 0,01771 | 0,01810 | 0,01849 | 0,01888 | 0,01928 | 0,01968 |
| 3 | 0,01304 | 0,01338 | 0,01373 | 0,01409 | 0,01445 | 0,01481 | 0,01518 |
| 4 | 0,01089 | 0,01122 | 0,01155 | 0,01189 | 0,01224 | 0,01259 | 0,01295 |
| 5 | 0,00961 | 0,00992 | 0,01025 | 0,01058 | 0,01092 | 0,01127 | 0,01162 |
| 6 | 0,00875 | 0,00906 | 0,00938 | 0,00971 | 0,01005 | 0,01040 | 0,01075 |
| 7 | 0,00814 | 0,00845 | 0,00877 | 0,00909 | 0,00943 | 0,00978 | 0,01014 |
| 8 | 0,00768 | 0,00799 | 0,00830 | 0,00863 | 0,00898 | 0,00933 | 0,00969 |
| 9 | 0,00732 | 0,00763 | 0,00795 | 0,00828 | 0,00863 | 0,00898 | 0,00935 |
| 10 | 0,00704 | 0,00734 | 0,00766 | 0,00800 | 0,00835 | 0,00871 | 0,00909 |
| 11 | 0,00680 | 0,00711 | 0,00743 | 0,00777 | 0,00812 | 0,00849 | 0,00887 |
| 12 | 0,00661 | 0,00692 | 0,00724 | 0,00758 | 0,00794 | 0,00831 | 0,00870 |
| 13 | 0,00645 | 0,00675 | 0,00708 | 0,00742 | 0,00779 | 0,00817 | 0,00856 |
| 14 | 0,00630 | 0,00661 | 0,00694 | 0,00729 | 0,00766 | 0,00804 | 0,00845 |
| 15 | 0,00618 | 0,00649 | 0,00682 | 0,00718 | 0,00755 | 0,00794 | 0,00835 |

Tabela 23: Custo da geração de água quente pelo TC2 em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização.

| C_{aq2} [US\$/kWh] | | | | | | | |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| k | 2% | 4% | 6% | 8% | 10% | 12% | 14% |
| 1 | 0,03502 | 0,03565 | 0,03627 | 0,03690 | 0,03752 | 0,03814 | 0,03877 |
| 2 | 0,01927 | 0,01974 | 0,02022 | 0,02070 | 0,02118 | 0,02166 | 0,02215 |
| 3 | 0,01402 | 0,01444 | 0,01487 | 0,01531 | 0,01575 | 0,01619 | 0,01664 |
| 4 | 0,01139 | 0,01180 | 0,01220 | 0,01262 | 0,01304 | 0,01347 | 0,01391 |
| 5 | 0,00982 | 0,01021 | 0,01061 | 0,01101 | 0,01143 | 0,01185 | 0,01229 |
| 6 | 0,00877 | 0,00915 | 0,00954 | 0,00995 | 0,01036 | 0,01079 | 0,01122 |
| 7 | 0,00802 | 0,00840 | 0,00879 | 0,00919 | 0,00961 | 0,01004 | 0,01048 |
| 8 | 0,00746 | 0,00783 | 0,00822 | 0,00863 | 0,00905 | 0,00948 | 0,00993 |
| 9 | 0,00702 | 0,00740 | 0,00779 | 0,00819 | 0,00862 | 0,00906 | 0,00951 |
| 10 | 0,00667 | 0,00705 | 0,00744 | 0,00785 | 0,00828 | 0,00872 | 0,00918 |
| 11 | 0,00639 | 0,00676 | 0,00716 | 0,00757 | 0,00800 | 0,00845 | 0,00892 |
| 12 | 0,00615 | 0,00652 | 0,00692 | 0,00734 | 0,00778 | 0,00824 | 0,00871 |
| 13 | 0,00595 | 0,00632 | 0,00672 | 0,00715 | 0,00759 | 0,00806 | 0,00854 |
| 14 | 0,00578 | 0,00615 | 0,00656 | 0,00698 | 0,00744 | 0,00791 | 0,00840 |
| 15 | 0,00563 | 0,00601 | 0,00641 | 0,00684 | 0,00730 | 0,00778 | 0,00828 |

Tabela 24: Custo da geração de água fria pelo SRA em relação às taxas anuais de juros e o fator de amortização.

| | | C_{af} [US\$/kWh] | | | | | |
|----|---------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| k | 2% | 4% | 6% | 8% | 10% | 12% | 14% |
| 1 | 0,09712 | 0,09885 | 0,10057 | 0,10230 | 0,10402 | 0,10574 | 0,10747 |
| 2 | 0,05360 | 0,05490 | 0,05622 | 0,05754 | 0,05887 | 0,06020 | 0,06155 |
| 3 | 0,03909 | 0,04026 | 0,04145 | 0,04265 | 0,04386 | 0,04509 | 0,04633 |
| 4 | 0,03184 | 0,03295 | 0,03408 | 0,03523 | 0,03639 | 0,03758 | 0,03878 |
| 5 | 0,02749 | 0,02856 | 0,02966 | 0,03079 | 0,03194 | 0,03311 | 0,03431 |
| 6 | 0,02459 | 0,02564 | 0,02673 | 0,02785 | 0,02899 | 0,03017 | 0,03137 |
| 7 | 0,02252 | 0,02356 | 0,02464 | 0,02576 | 0,02691 | 0,02809 | 0,02930 |
| 8 | 0,02097 | 0,02200 | 0,02308 | 0,02420 | 0,02536 | 0,02655 | 0,02778 |
| 9 | 0,01976 | 0,02079 | 0,02187 | 0,02300 | 0,02417 | 0,02538 | 0,02663 |
| 10 | 0,01880 | 0,01983 | 0,02091 | 0,02205 | 0,02323 | 0,02446 | 0,02573 |
| 11 | 0,01801 | 0,01904 | 0,02013 | 0,02127 | 0,02247 | 0,02372 | 0,02501 |
| 12 | 0,01735 | 0,01838 | 0,01948 | 0,02064 | 0,02185 | 0,02312 | 0,02443 |
| 13 | 0,01680 | 0,01783 | 0,01894 | 0,02011 | 0,02133 | 0,02262 | 0,02395 |
| 14 | 0,01632 | 0,01736 | 0,01847 | 0,01966 | 0,02090 | 0,02220 | 0,02356 |
| 15 | 0,01591 | 0,01695 | 0,01808 | 0,01927 | 0,02053 | 0,02186 | 0,02323 |

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos, foi plotado um gráfico do custo de eletricidade (Gráfico 6) para as taxas anuais de 2 %, 8 % e 14 % para a avaliação da variação do custo ao variar estas taxas. Um segundo gráfico foi plotado (Gráfico 10), com a taxa anual fixa, para facilitar a variação dos custos calculados para um dado período de amortização, no caso $k = 7$ anos e, nesse mesmo gráfico é feita uma comparação dos custos para um período de amortização maior ($k = 15$ anos).

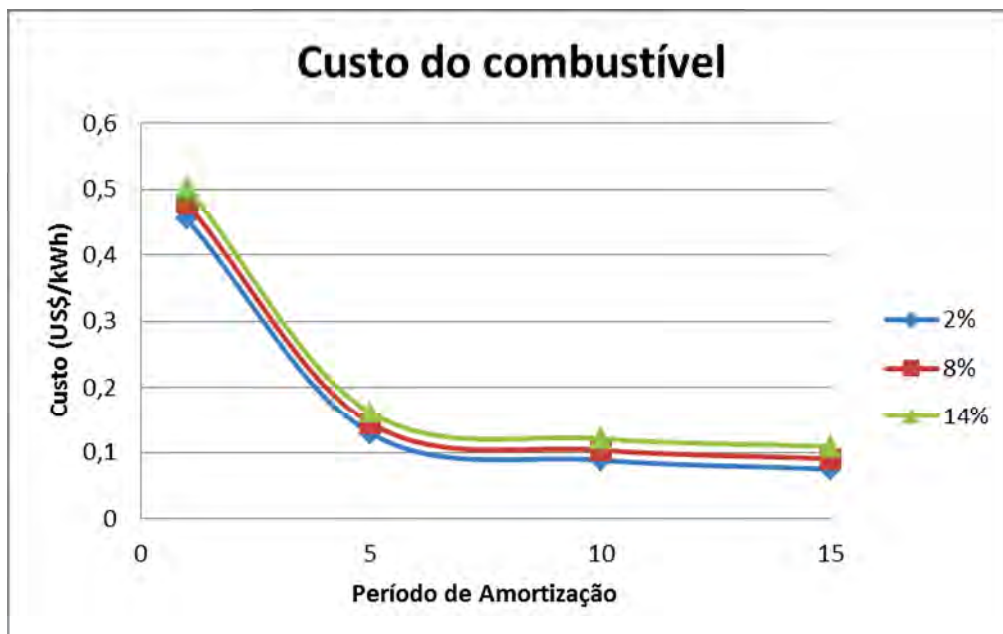


Gráfico 5: Custo do combustível para taxas anuais de 2 %, 8 % e 14 %.

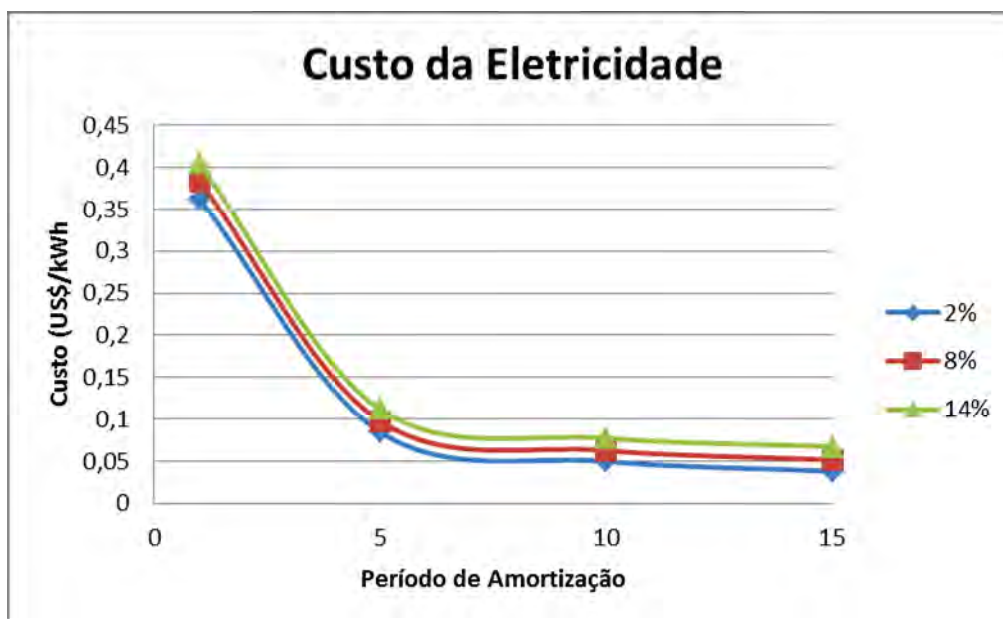


Gráfico 6: Custo da eletricidade para taxas anuais de 2 %, 8 % e 14 %.

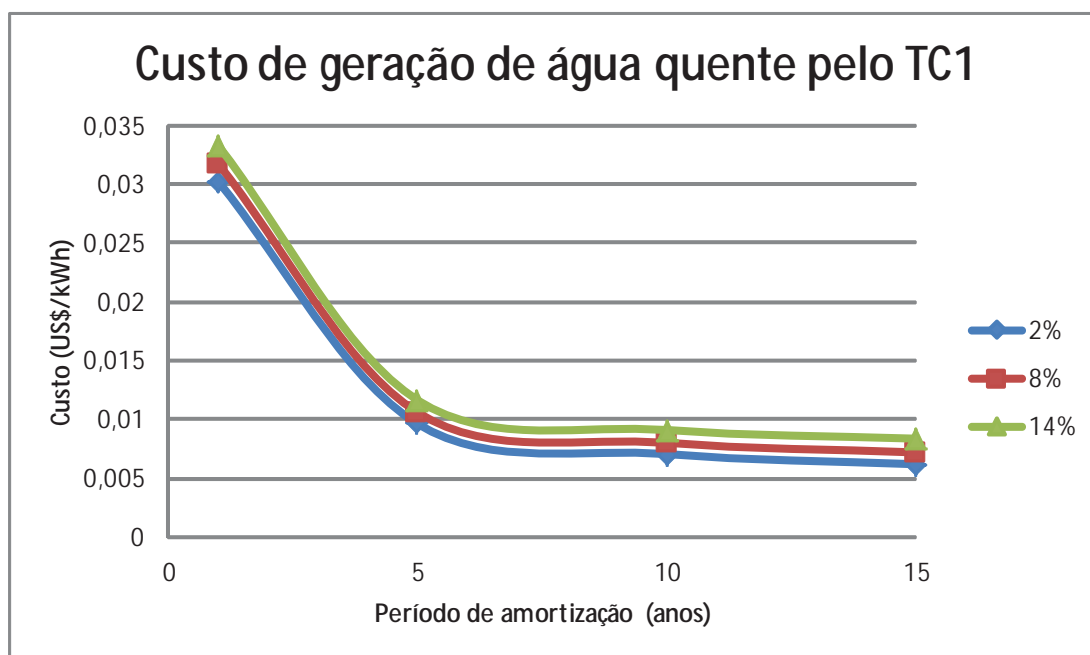


Gráfico 7: Custo de geração de água quente pelo TC1 para taxas anuais de juros de 2 %, 8 % e 14 %.

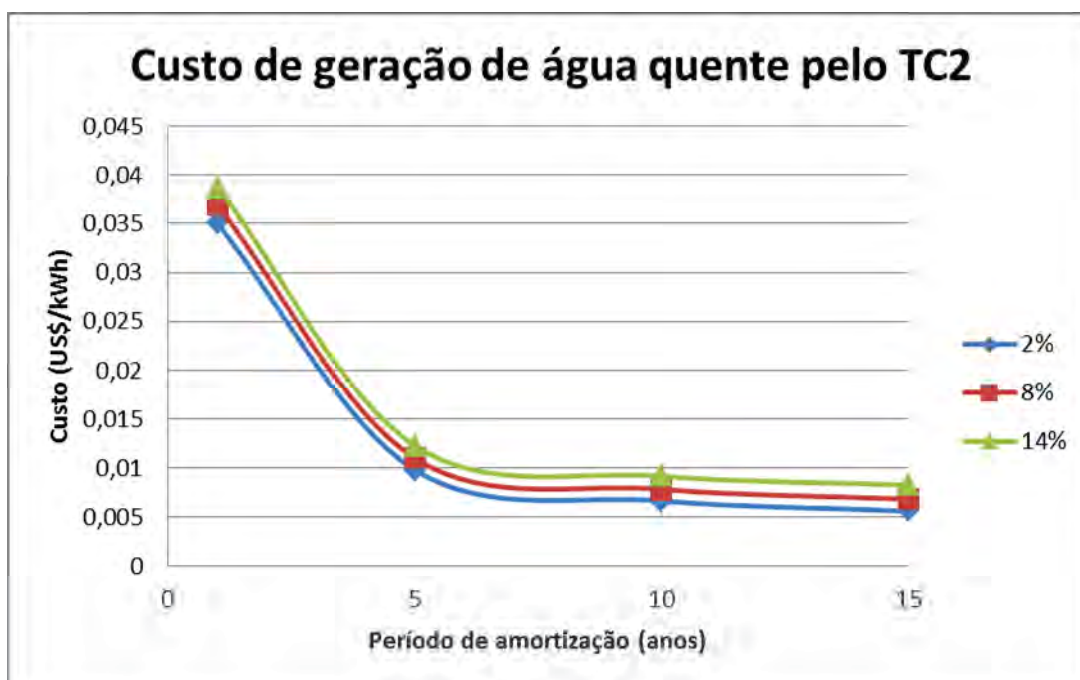


Gráfico 8: Custo de geração de água quente pelo TC2 para taxas anuais de juros de 2 %, 8 % e 14 %.



Gráfico 9: Custo de geração de água fria pelo SRA para taxas anuais de juros de 2 %, 8 % e 14 %.

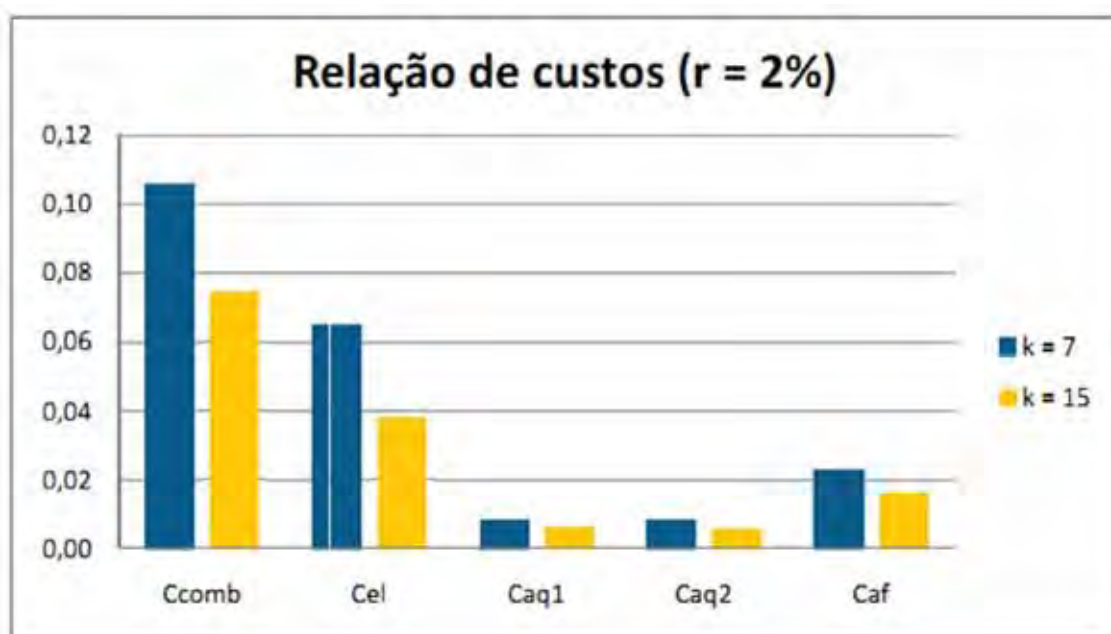


Gráfico 10: Comparação dos custos para uma taxa anual de 2 %, variando o período de amortização.

9. CONCLUSÕES

O estudo dos filtros cerâmicos utilizados no gaseificador é essencial, pois a redução do teor de particulados, e do teor de alcatrão é fundamental para garantir o funcionamento do motor de combustão interna (MCI), e ampliar a vida útil do sistema, além de melhorar sua eficiência. As exigências para estes filtros cerâmicos, cuja função principal é remover as partículas entre 0,2 e 10 μm , são: permeabilidade elevada, porosidade de 50 a 80%, resistência à erosão, e resistência ao choque térmico. Com o objetivo de desenvolver um filtro cerâmico que possua resistência à abrasão e ainda resistência ao choque térmico, nos estudos realizados no presente trabalho se propôs a utilização da fase cordierita (por possuir alta resistência ao choque térmico e baixo coeficiente de expansão térmica) junto com uma fase vitrocerâmica (que possui elevada resistência à abrasão). Para a confecção do molde do filtro foi proposto o uso da técnica de colagem por barbotina, por ser um método simples, de baixo custo, que apresenta porosidade controlada e boa exatidão dimensional.

A associação de um gaseificador do tipo *downdraft* a um motor de combustão interna e a um gerador elétrico fornece um meio seguro de produção de energia. O sistema de cogeração estudado neste presente trabalho demonstrou pelos cálculos termodinâmicos ter as seguintes eficiências: 24,5% para geração de eletricidade, 21,6% para a geração de água quente e 5,8% para a geração de água fria, resultando em uma eficiência de geração global de 51,8%. Pela análise econômica, comparou-se a viabilidade econômica desse sistema de cogeração para diferentes períodos de amortização (entre 1 e 15 anos) e três diferentes taxas de juros (2%, 8%, 14%), demonstrando a visível diminuição dos custos da eletricidade, de água quente e de água fria com o aumento do período de amortização.

Conclui-se que sistemas de gaseificadores associados a motores de combustão interna têm boa aplicação técnica, com custos relativamente baixos, podendo participar como coadjuvante na geração descentralizada de energia para comunidades isoladas.

10. BIBLIOGRAFIA

ARAUZO, J, 1999, “Reactores de Lecho Movil Downdraft”, Encontro sobre gasificación de biomasa, Madrid – España.

BILBAO, R & FERNANDEZ, F, (1998) “Gasificación de Biomosas en un lecho móvil de corrientes paralelas”. Ingeniería Química, 20 (226) 199-203

BOLOY, R. A. M. “Simulação Computacional de Gaseificação de madeira de pequeno porte empregando um gaseificador Downdraft” 2010 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

BRITO, J. O. ; Ferraz, E. S. B. ; BARRICHELO, L. E. G. ; COUTO, H. T. Z. . A adubação mineral e seus efeitos sobre os anéis de crescimento da madeira de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*.. IPEF. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, v. 32, p. 5-77, 1986.

CHRISTIAN J. CORONADO RODRIGUEZ. “Análise Técnica-Econômica de um gaseificador de biomassa 100Kg/H para acionamento de um motor de combustão interna.” Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Depto. de Energia- FEG. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

COELHO, S. T.; “Mecanismos para Implantação da Cogeração de Eletricidade a partir de Biomassa - Um Modelo para o Estado de São Paulo” Agosto 1999.

CUNHA, J. P. A. R. Introdução a Gaseificação Biomassa. Viçosa M.G., 2001 16p, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de VIÇOSA-MG.

D. MULLER; W. ACCHAR; G. M. C. SILVA; E. A. MOREIRA; J. R. COURY; M. D. M. INNOCENTINNI; D. HOTZA; C. R. RAMBO “Processamento e caracterização de filtros cerâmicos fibrosos”. Cerâmica vol.55 no.335 São Paulo July/Sept. 2009

EUROPEAN COMMISSION OF ENERGY, "Guideline for Safe and Eco-friendly Biomass Gasification", European Commission of Energy, November 2002.

INNOCENTINI M. D. M. "Filtração de gases a altas temperaturas". 1997, p266. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Depto. de Eng. Química, Universidade Federal de São Carlos, 1997.

K. MANIATIS, "Progress in biomass gasification, an overview". Europe Commission, Brusells, Belgium, 2005.

M. A. ALVIN, Impact of Char and Ash fines on Porous Ceramic Filter Life, Westinghouse Electric Corporation Science & Technology Center, New Orleans, 1996

M. A. ALVIN, "Advanced Ceramic Materials for Use in High Temperature Particulate Removal Systems," 1995 AIChE Annual Meeting, Miami, FL, November 17,1995.

MCKENDRY, P. "Energy Production from Biomass (Part I): Overview of Biomass." Bioresource Technology 83(1): 37-46. 2002. (ISSN 0960-8524)

MCKENDRY, P. "Energy Production from Biomass (Part II): Conversion Technologies." Bioresource Technology 83.

MCKENDRY P. "Energy Production from Biomass (Part III): Gasification Technologies", Bioresource Technology, Vol 83, Issue 1, May 2002, Pag. 55-63.
NIPE/UNICAMP, "Gaseificação de Biomassa - Histórico e Conceitos Básicos. Congresso de tecnologia de gaseificação", 2002.

N. L. FREITAS, M. G. MANEIRO, J. R. COURY, “Cerâmica 50”, 316 (2004) 355p.

PACHECO, T. A. “Controle Avançado de Filtros de Mangas”; publicado na Revista Meio Filtrante nº 25, Março de 2007. Disponível em: (<http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=287>)

REED, T. “Biomass Gasification” Energy Technology Review: nº 67. Park Ridge, New Jersey, USA. 1981

R, S RIBEIRO, LIMA R F C, VERAS C A G. “Caracterização De Emissões Em Sistema de Geração Energética por Gaseificação de Biomassa Aplicada a Comunidades Isoladas”, 16º POSMEC, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SILVA, J. N.; SOBRINHO, J. C., SAIKI, E. T. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. Engenharia Agrícola, v.24, n.2, p.405-411, 2004.

S.V.B. VAN PAASEN, L.P.L.M. RABOU, “Tar Removal With a Wet Electrostatic Precipitator (ESP); A Parametric Study”, 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection” in Rome, Italy, 10-14 May 2004

Internet: <http://minerals-and-metals-prices.blogspot.com/> (Consultado em Agosto 2011)

Internet: http://www.beckins.com.br/tabela_classificacao.asp (Consultado em Agosto 2011)

Internet: <http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=489> (Consultado em Setembro 2011)

