

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA
EUCALYPTUS A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO PARA
UTILIZAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

CAROLANE DE MACÊDO ALMEIDA

2014

CAROLANE DE MACÊDO ALMEIDA

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA *EUCALYPTUS* PARTIR
DA GASEIFICAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de curso apresentada à
Universidade de Brasília, como parte das exigências do
programa de graduação em Química Tecnológica, para
obtenção do título de Bacharel.

Orientador (a): Andressa Regina Vasques Mendonça

BRASÍLIA

DISTRITO FEDERAL - BRASIL

2014

Dedico este trabalho, primeiramente a mim mesma, pelos meus esforços para alcançar tamanha conquista, aos meus parentes e familiares, por fazerem parte da minha jornada de vida, e ao meu namorado e grande amigo, companheiro de vida e universidade.

Amo todos vocês!

AGRACEDIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida.

A minha família linda e abençoada, base da minha educação, por estar comigo até hoje, sempre me apoiando e me protegendo.

Ao namorado, Hélio Escaleira Gomes, por toda força, carinho e companheirismo de cada dia.

A minha orientadora de trabalho de conclusão de curso, Professora Andressa Regina Vasques Mendonça pela excelente orientação, estando sempre disponível para todos os problemas possíveis.

A minha orientadora de laboratório, professora Claudia Cristina Gatto, pelo apoio, dedicação e amizade de tantos anos.

Aos meus colegas de curso e laboratório por fazerem parte desta jornada tão difícil em nossas vidas.

ÍNDICE GERAL

LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE EQUAÇÕES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMECLATURA	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. Histórico da Utilização de Biomassas no Brasil.....	3
2.1.1. O cultivo do eucalipto no Brasil	5
2.1.2. Potencial energético da biomassa eucalipto	5
2.2. Constituição macromolecular da madeira de eucalipto.....	6
2.3. Caracterização da biomassa.....	10
2.3.1. Poder calorífico	10
2.3.2. Análise elementar	11
2.3.3. Análise imediata.....	11
2.3.4. Granulometria.....	12
2.4. Técnicas de aproveitamento de biomassa	12
2.5. Gaseificação	13
2.5.1. Tipos de gaseificadores.....	14
2.5.1.1. Gaseificadores contracorrentes	15
2.5.1.2. Gaseificadores concorrentes	16
2.5.1.3. Gaseificadores de fluxo cruzado	17
2.5.1.4. Gaseificadores de leito fluidizado.....	18
2.6. Balanços de massa e energia do sistema.....	19
2.6.1. Balanço de massas	19

2.6.2. Balanço de energia.....	20
2.7. Estudos da gaseificação de biomassas para fins de geração de energia elétrica	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1. Caracterização da região de estudo.....	23
3.1.1. Justificativa para a escolha da área.....	23
3.2. Descrição do sistema de geração.....	25
3.3. Análise econômica	28
3.3.1. Custos de implantação da planta.....	29
3.3.2. Custos de reflorestamento	32
3.3.2.1. Estimativa área basal volume e biomassa por hectare	31
3.3.2.2. Quantidade de energia por hectare e área necessária em função da potência instalada	32
3.3.3. Custos de colheita e transporte	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. Análise dos custos de implantação da planta	34
4.1.1. Memória de cálculo	34
4.2. Análise dos custos de reflorestamento	43
4.3. Análise dos custos de colheita e transporte	44
5. CONCLUSÃO	46
6. BIBLIOGRAFIA	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Estimativa do potencial energético, com base na quantidade de Resíduos	6
Tabela 2 – Poder calorífico da biomassa	11
Tabela 3 – Composição elementar típica da madeira e cascas	11
Tabela 4 –Análise Imediata realizada para três diferentes espécies de eucalipto .	12
Tabela 5 – Custos anualizados para a implantação e utilização de um sistema gerador de energia elétrica que atua 24h por dia durante todo o ano.....	38
Tabela 6 – Custos anualizados para a implantação e utilização de um sistema gerador de energia elétrica que atua 24h por dia durante todo o ano.....	39
Tabela 7 – Custos anualizados para a implantação e utilização de um sistema gerador de energia elétrica que atua 24h por dia durante todo o ano.....	40
Tabela 8 – Custos anualizados para a implantação e utilização de um sistema gerador de energia elétrica que atua 24h por dia durante todo o ano.....	41
Tabela 9 – Cotação de madeira de eucalipto(R\$ / m ³)	44
Tabela 10 – Custos médios da atividade de colheita	44
Tabela 11 – Custos médios da atividade de transporte.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ligação β -1,4 entre os resíduos de D-glucopirranose e as pontes de hidrogênio intramoleculares que reforçam a estrutura linear da celulose	7
Figura 2 – Composição da hemicelulose dentro da parede vegetal. Resíduos de hexoses e pentoses formando a estrutura ramificada hemicelulose, que interage com as demais moléculas da parede celular vegetal	8
Figura 3 – Alcoóis precursores das unidades fenilpropanóidesguaiacila (G), siringila (S) e p-hidroxifenila (H).....	8
Figura 4 – Localização da lignina dentro da parede celular vegetal, preenchendo os espaços entre a celulose e a hemicelulose.....	9
Figura 5 – Parede celular vegetal com seus três principais constituintes: (laranja) celulose, (azul) hemicelulose e (verde) lignina	10
Figura 6 – Gaseificador contracorrente	16
Figura 7 – Gaseificador concorrente.....	17
Figura 8 – Gaseificador de fluxo cruzado.....	17
Figura 9 – Gaseificador de leito fluidizado	18
Figura 10 – Gaseificador de leito fixo do tipo concorrente de duplo estágio de gaseificação.....	21
Figura 11 – Região de localização de exploração e utilização do eucalipto	23
Figura 12 – Imagem de satélite de São Luis do Paraitinga.....	24
Figura 13 – Delineamento da região de estudo.....	24
Figura 14 – Diagrama de blocos do processo de geração a partir da madeira de eucalipto	25
Figura 15 – Esquema do gaseificador importado do IIS	26
Figura 16 – Localização da instrumentação instalada no gaseificador.....	27
Figura 17 – Gaseificador utilizado para a produção de gás de síntese, que irá abastecer os motores para geração de energia elétrica.....	28
Figura 18 – Participação dos custos de acordo com o investimento total para a implantação do equipamento.....	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Reação de oxidação do carbono	12
Equação 2 – Reação de oxidação do carbono	12
Equação 3 – Reação heterogênea de gaseificação	12
Equação 4 – Reação heterogênea de gaseificação	12
Equação 5 – Reação heterogênea de gaseificação	12
Equação 6 – Reação homogênea de gaseificação	12
Equação 7 – Reação homogênea de gaseificação	12
Equação 8 – Reação de craqueamento do alcatrão	12
Equação 9 – Reação de oxidação parcial dos produtos da pirólise	12
Equação 10 – Balanço de massa	19
Equação 11 – Balanço de massa	20
Equação 12 – Balanço de energia	20
Equação 13 – Custo do equipamento anualizado	29
Equação 14 – Custo de operação e manutenção do equipamento	30
Equação 15 – Quantidade de energia elétrica gerada.....	30
Equação 16 – Estimativa da área basal/hectare	31
Equação 17 – Volume de uma árvore.....	31

SIMBOLOGIA E NOMECLATURA

$\frac{dm_{vc}}{dt}$	Variação da quantidade de massa no volume de controle.
$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s$	Soma das vazões mássicas na entrada e saída, respectivamente.
$\dot{m}_{ar}$	Descarga de ar na entrada do gaseificador, (kg/s).
$\dot{m}_c$	Descarga do combustível, (kg/s).
$\dot{m}_{\acute{a}gua}$	Descarga de umidade contida no combustível, (kg/s).
$\dot{m}_g$	Descarga de cada componente do gás produto (kg/s).
h_{ar}	Entalpia do ar de gaseificação, (J/kg).
h_c	Entalpia do combustível, (J/kg).
h_g	Entalpia de cada componente do gás produto, (J/kg).
PCS_c	Poder calorífico superior da cada componente do gás produzido (J/kg).
Q_p	Calor perdido ao ambiente (J/kg).
C_e	Custo do equipamento, (R\$).
R_t	Remuneração do trabalhador, (R\$/mês).
N_t	Número de trabalhadores.
$Q_{energia}$	Quantidade de energia elétrica gerada, (kW).
N_{du}	Número de dias de utilização do equipamento, (dias).
F_c	Fator de carga.
P_g	Potência do gaseificador, (kW).
B	Área basal.
DAP	Diâmetro à altura do peito (1,30 m acima do solo).

V	Volume.
D_1	Diâmetro da base, (cm).
D_2	Diâmetro a 50% do comprimento do troco, (cm).
L	Comprimento do tronco, (cm).

RESUMO

ALMEIDA, Carolane de Macedo. **Aproveitamento Energético da Biomassa Eucalipto a partir da Gaseificação para Utilização na Produção de Energia Elétrica.** Universidade de Brasília, dezembro de 2014. Orientador(a): Andressa Regina Vasques Mendonça.

A tecnologia de gaseificação é uma tecnologia antiga que voltou à tona com a crise do petróleo. Quando especula-se que tipo de biomassa utilizar para a implantação da gaseificação, o principal fator a ser considerado é a abundância da mesma no local a ser utilizado. Porém, a madeira de eucalipto entra como uma peça fundamental no uso de biomassa, isso porque ela se apresenta como uma matéria de fácil adaptação ao solo Brasileiro e tem como característica principal um crescimento rápido. Dessa forma, em casos específicos não seria necessário a espera pela rotatividade de resíduos gerados ou abundância dos mesmos. Este trabalho teve como objetivo demonstrar um estudo de viabilidade econômica da gaseificação do eucalipto com foco na utilização do gás de síntese obtido a partir desse processo, para a geração de energia elétrica em São Luis do Paraitinga, São Paulo. Assim, estabeleceu-se uma área específica de plantação de eucalipto a ser utilizado, gaseificador projetado pelo Indian Institute of Science, e motor de combustão interna à diesel da marca MWM de 20 kW. Considerando uma eficiência de 80 % do motor foram elaborados cálculos para avaliar quanto de energia poderia ser produzida ao longo de um ano e, com base nessa informação, pode-se calcular o preço da energia final considerando os custos com o equipamento, operação e manutenção chegando a um valor final de 0,96 kW.

Palavras-chave: Eucalipto/gaseificação/geração de energia.

ABSTRACT

ALMEIDA, Carolane de Macedo. **Harnessing Energy from Biomass Gasification from Eucalyptus for Use in the Production of Electricity.** University of Brasilia, December 2014. Advisor (a): Andressa Regina Vasques de Mendonça.

Gasification technology is an old technology that resurfaced with the oil crisis. When it is speculated that type of biomass used for the implementation of gasification, the main factor to be considered is the abundance of it in the location to be used. However, the eucalyptus wood comes as a key player in the use of biomass, because she appears as a matter of easy adaptation to Brazilian soil and its main characteristic rapid growth. Thus, in specific cases would not be necessary to wait for the turnover generated waste or abundance of them. This study aimed to demonstrate economic feasibility study of Eucalyptus gasification focusing on the use of synthesis gas obtained from this process, for the generation of electricity in São Luis do Paraitinga, Sao Paulo. It set up a specific area of eucalyptus plantation in use, gasifier designed by the Indian Institute of Science, and internal combustion engine diesel MWM mark of 20 kW. Considering a 80% engine efficiency calculations are designed to assess how much energy could be produced over a year and, based on that information, one can calculate the price of final energy considering the cost of the equipment, operation and maintenance reaching a final value of 0,96 kW.

Key words: Eucalyptus/Gaseification/Power Generation.

1. INTRODUÇÃO

Carvão, petróleo e gás natural são três grandes tipos de combustíveis fósseis utilizados atualmente como fonte primária de energia e, tiveram estes, grandes impactos na evolução do homem, tanto para o melhor, a nível social, tecnológico, econômico e uma grave consequência para o meio ambiente. Um dos principais problemas para a utilização deste tipo de combustível é que estes são fonte de energias não renováveis. A economia atual é muito dependente deste tipo de combustível e, com o esgotamento dessas fontes de energia, o preço dos combustíveis principalmente oriundos do petróleo está cada vez maior influenciando assim, em grande parte, a crise financeira a que se vive atualmente (AMEA, 2014).

Visando esta problemática, as tecnologias de termo conversão surgiram na década de 70 como uma proposta para ajudar suprir a necessidade crescente por fontes de energias. O termo energia alternativa não deriva apenas de uma alternativa eficiente, ele é sinônimo de uma energia limpa, pura, não poluente, a princípio inesgotável e que pode ser encontrada e utilizada em qualquer lugar, pela grande variedade dos tipos de energia.

Quando se busca um desenvolvimento sustentável, a escolha por qual tipo de energia utilizar se torna um fator ponderante e o uso de energias renováveis pode colaborar substancialmente para reduzir as emissões atmosféricas. No Brasil, a oferta interna de energia no ano de 2013 foi de aproximadamente 296 milhões de toneladas de equivalentes de petróleo. As fontes renováveis de energia foram responsáveis por quase 80 % desse valor (EPE, 2014).

O Brasil possui condições naturais e geográficas muito favoráveis à produção de biomassa, podendo então, assumir uma posição de destaque no cenário mundial no que se diz respeito a produção e uso da biomassa como recurso energético. Por sua situação geográfica, o país recebe intensa radiação solar ao longo do ano, o que é a fonte de energia fundamental para a produção de biomassa, quer seja para alimentação ou para fins agroindustriais. Outro aspecto importante é que o Brasil possui grande quantidade de terra agricultável, com boas características de solo e condições climáticas favoráveis (MMA, 2014).

As tecnologias mais usadas no aproveitamento energético da biomassa podem ser baseadas na combustão (queima) direta ou processos termoquímicos. Contudo, a eficiência elétrica de sistemas de geração de energia com uso de biomassa, diminui drasticamente para baixas potências, tanto em sistemas com combustão e ciclo a vapor, quanto em sistemas com gaseificação. Entretanto, observa-se que, ainda para baixas potências, os sistemas com gaseificação e pirólise têm maior eficiência quando comparados a sistemas com combustão e ciclo a vapor.

A gaseificação de biomassa vem ganhando cada vez mais espaço no cenário mundial quando se diz respeito a utilização de novas formas de produzir energia. Isso se deve principalmente porque na gaseificação pode-se transformar em geral, qualquer tipo de material sólido em um gás energético, por meio da oxidação parcial a temperaturas elevadas. Nos países mais industrializados, os resíduos que são gerados podem ser utilizados pra produzir energia através da gaseificação e aumentar os lucros das empresas.

Futuramente, com a possível escassez dos combustíveis fósseis e com a utilização crescente de biomassa como combustível para a produção de energia, cada região desenvolverá os melhores processos que atendas as suas necessidades locais de forma que estes combustíveis ou energia gerada sejam mais baratos, não causem danos ao planeta em relação a emissão de gases na atmosfera e sejam independentes de outras regiões (SÁNCHEZ, 2010).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Histórico da Utilização de Biomassas no Brasil

O uso da biomassa para geração de energia surgiu nos primórdios da humanidade, através da utilização da madeira para cocção e aquecimento. Na área da energia, a madeira é conhecida como lenha e/ou carvão vegetal. O grande aumento da participação do consumo de biomassa pela indústria vem principalmente do carvão vegetal. A utilização deste combustível se deu a partir da metade da década de 80, quando muitas indústrias passaram a substituir o óleo pelo carvão. O processo de produção deste combustível é realizado nas carvoarias com a transformação da lenha neste específico carvão. É uma biomassa que possui alto poder calorífico, atendendo assim as necessidades da indústria por altas temperaturas na produção de bens e sendo um importante combustível para a obtenção de gás de síntese através da gaseificação (REVISTA DA MADEIRA, 2009).

O processo comercial para produzir gás combustível através da gaseificação, surgiu a partir de 1780 com o desenvolvimento do processo de preparação de carvão em coque para a siderurgia. Nessa mesma época surgiram os primeiros gaseificadores para produzir gás combustível utilizado na iluminação pública. Esse processo foi utilizado anos depois no Rio de Janeiro em 1854, na capital do Rio Grande do Norte em 1860 e em São Paulo em 1872. Entre 1942 e 1943, gaseificadores foram instalados em aproximadamente 15.000 carros do Brasil. Assim, a história da gaseificação foi praticamente esquecida com a chegada dos combustíveis derivados do petróleo, e vem retomando, cada dia mais, a sua história com a escassez destes combustíveis não renováveis (SÁNCHEZ, 2010).

Nos últimos 3 anos, houve uma ligeira redução no consumo de carvão vegetal pelas indústrias. Muito desta redução está associada à inserção do gás boliviano no parque industrial do centro-sul brasileiro e ausência de políticas públicas para o incentivo do uso deste energético.

Apesar de políticas públicas terem sido aplicadas para a disseminação do GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) no Brasil na década de 80, nos últimos anos percebe-se

um retrocesso no uso deste tipo de energia para cocção e consequentemente um aumento na utilização da lenha. Para esta finalidade, seria importante um incentivo governamental maciço nas camadas menos favorecidas da população, pois a distribuição da lenha para o uso final de cocção não está concentrada nas mãos de grandes empresas de distribuição de energia, como ocorre com o GLP. Desta forma, a democratização do uso da lenha seria mais eficaz (REVISTA DA MADEIRA, 2009).

Uma análise do Balanço Energético Nacional permite observar que houve um decréscimo na participação relativa (%) da biomassa florestal na matriz energética brasileira onde sua participação que foi de aproximadamente 80,50 % em 1940, passou a ser de apenas 9% em 1998, no entanto a sua participação quantitativa, em toneladas equivalentes de petróleo (tep), tem permanecido relativamente constante, tendo flutuado na faixa entre 28 e 32 milhões de tep nas décadas de 70 e 80 e, em média contribuiu com cerca de 24 milhões de tep nos anos 90, o que demonstra existir um mercado cativo de biomassa florestal para utilizações energéticas no Brasil (LIMA, 1993).

Entre os resíduos de biomassas de cultivos agrícolas, o bagaço e a palha de cana são considerados algumas das mais importantes no contexto da agricultura brasileira, sendo aproveitadas em caldeiras para gerar energia nas usinas, além do excedente energético ter a possibilidade de ser acrescido ao sistema elétrico. Além dos resíduos provenientes da cultura da cana-de-açúcar, a grande maioria das culturas brasileiras gera biomassa que podem se utilizadas para a geração de energia. No entanto, grande parte é queimada ou retorna ao solo através da incorporação dos restos de cultura.

Uma das biomassas que vem ganhando muito espaço no cenário brasileiro tanto no cultivo como no aproveitamento energético é o eucalipto, isso porque o eucalipto é uma planta muito bem adaptada ao solo do Brasil e apresenta quantidades consideráveis de celulose e um poder calorífico elevado. Podemos citar outros resíduos tais como: a casca de arroz, cascas de castanhas, côco da Bahia, côco de babaçu e dendê, cascas de laranjas, etc, (MMA, 2014).

2.1.1. O Cultivo do Eucalipto no Brasil

O Eucalipto é uma árvore originada da Austrália e da Indonésia e pertence ao Gênero *Eucalyptus* que possui mais de 600 espécies. Em território brasileiro, o eucalipto encontrou ótimas condições de clima e solo para se desenvolver, com crescimento mais rápido que nos demais países e alto índice de produtividade. Atualmente, as florestas de eucalipto correspondem a cerca de 4,8 milhões de hectares no Brasil segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2010). Desse total, 1,8 milhões são cultivados pela indústria de celulose e papel, o que corresponde a 81,2% das florestas plantadas desse setor.

Considerando o uso final da madeira, devem-se levar em consideração as suas propriedades constituintes, partindo do princípio que estas devam possuir qualidades adequadas relacionadas ao seu uso final. O eucalipto por ser uma planta muito versátil e altamente produtiva, atende em muito à necessidade como matéria-prima e, principalmente para produção com fins energéticos no país (BARCELLOS, 2005).

2.1.2. Potencial Energético da Biomassa *Eucalyptus*

A utilização de madeira para produção de energia no Brasil é resumida basicamente em dois processos onde, um resulta em carvão vegetal através da carbonização e o outro no consumo direto da lenha através da combustão.

A justificativa para a geração desses dois tipos de energia através da madeira está em sua composição. O eucalipto possui em geral um alto poder calorífico, propriedade esta que se encontra diretamente relacionada com seu rendimento energético e a sua constituição química, onde os teores de celuloses, hemiceluloses, lignina, extrativos e substâncias minerais variam de uma espécie para outra. A densidade da madeira também é um fator relevante, pois esta é um índice de qualidade da madeira já que está relacionado com a produção de massa seca, propriedades físico-mecânicas e com a qualidade dos produtos (REVISTA DA MADEIRA, 2013).

Um estudo realizado pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais apresentou uma avaliação das características dos resíduos de exploração florestal do eucalipto para fins energéticos onde obteve resultados apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Estimativa do potencial energético do eucalipto, com base na quantidade de resíduos.

Material	Energia kJ/ha
Madeira	795,07 x 10 ⁶
Casca	107,18 x 10 ⁶
Copa e madeira fina	261,67 x 10 ⁶
Copa, madeira fina e casca	474,36 x 10 ⁶

Fonte: (Adaptada de IPEF, 2014).

Comparando-se os valores energéticos da madeira e dos resíduos (casca, copa e madeira fina) com os do óleo combustível e do “carvão vapor médio”, 1 hectare de floresta de eucalipto saligna, com 8 anos de idade, pode representar, em termos de madeira, o equivalente a 18,0 toneladas de óleo combustível e 46,5 toneladas de carvão vapor médio e, em termos de resíduo, o equivalente a 2,4 toneladas de óleo combustível e 6,3 toneladas de carvão vapor médio (IPEF, 2014).

A utilização da madeira e seus derivados para produção de energia da biomassa é um método prático e um recurso natural tradicional no Brasil, além de apresentar vantagens por ser renovável (fonte de energia limpa) e elevado potencial energético sustentável para o país.

2.2. Constituição Macromolecular da Biomassa Eucalipto

A composição química do eucalipto foi determinada aproximadamente após vários estudos. Os valores determinados podem variar, porém relativamente pouco, dependendo do local da colheita da amostra da madeira ou a espécie em questão, entre outros fatores. De um modo geral, a madeira é constituída de cinco macroestruturas: celulose, hemicelulose, lignina, moléculas de reserva energética (ex. amido, sacarose e óleos) e proteínas. Com exceção da proteína, que já possui mercado no setor alimentício, as quatro primeiras macromoléculas são de interesse da cadeia da energética (REVISTA DA MADEIRA, 2010).

A celulose é um polímero linear longo, oriundo da condensação de várias unidades D-glucopiranoses por ligações β -1,4, (MCKENDRY, 2002). As unidades se D-

glucopirranose, são ricas em grupamentos hidroxilas (OH^-), o que favorece a formação de interações intramoleculares que reforçam o caráter linear da molécula (Figura 1) e, intermoleculares entre celulosas, favorecendo a formação das microfibrilas. Estas características são responsáveis pela resistência física e química da estrutura como um todo. Regiões compactas, onde as interações intermoleculares acontecem com mais intensidade, são denominadas cristalinas e consistem em estruturas resistentes à degradação química e bioquímica, outras regiões menos compactas são denominadas de amorfas e são mais susceptíveis à degradação (NAKAI, 2014).

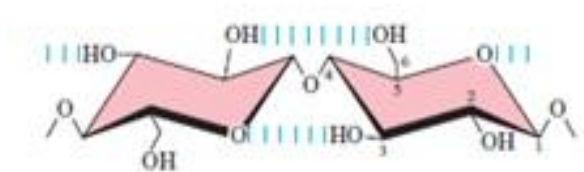


Figura 1. Ligação β -1,4 entre os resíduos de D-glucopirranose e as pontes de hidrogênio intramoleculares que reforçam a estrutura linear da celulose (Adaptado de LEHNINGER, 2006).

As hemiceluloses são responsáveis por dar flexibilidade às plantas. Isso se deve a sua constituição química formada por um grupo de polissacarídeos de cadeia ramificada e baixo peso molecular, que atua como agente de ligação entre a celulose e a lignina na parede das plantas. Os polissacarídeos presentes são resultados da condensação de vários monossacarídeos dos quais podemos citar as hexoses (D-glucopirranose, D-manopirranose, D-galactopirranose, D-ramnopirranose) e as pentoses (xilofuranose, com maior frequência, e arabinofuranose).

A hemicelulose possui uma configuração irregular e ausência de cristalinidade, devido a sua ramificação, o que confere absorção de água facilmente, contribuindo para a flexibilidade das fibras. A hemicelulose juntamente com a lignina, que se liga de modo covalente à primeira, formam a matriz que envolve a celulose, ajudando a conferir resistência física e química à estrutura da parede celular (Figura 2). O eucalipto possui entre 16% e 24% de hemicelulose (NAKAI, 2014).

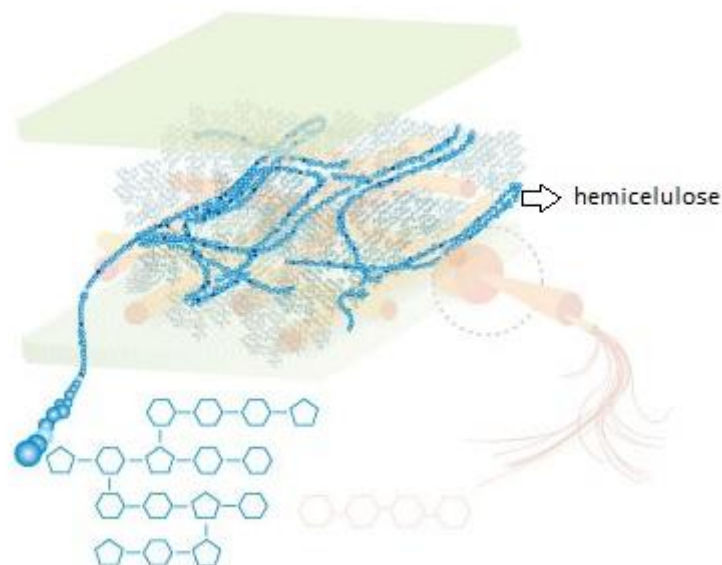


Figura 2. Ilustração da hemicelulose dentro da parede celular vegetal. Resíduos de hexoses e pentoses formando a estrutura ramificada da hemicelulose, que interage com as demais moléculas da parede celular vegetal (Adaptado de NAKAY, 2014).

A lignina é um composto químico altamente complexo e com grau de polimerização maior que o da celulose. O teor de lignina na biomassa vegetal é de aproximadamente 20 a 30%. Em geral, ela é classificada de acordo com a quantidade relativa dos monômeros guaiacila (G), siringila (S) e *p*-hidroxifenila (H) (figura 3). No eucalipto, a lignina é geralmente formada pelas unidades siringila e guaiacila (lignina S-G) (BARBOSA et al., 2008).

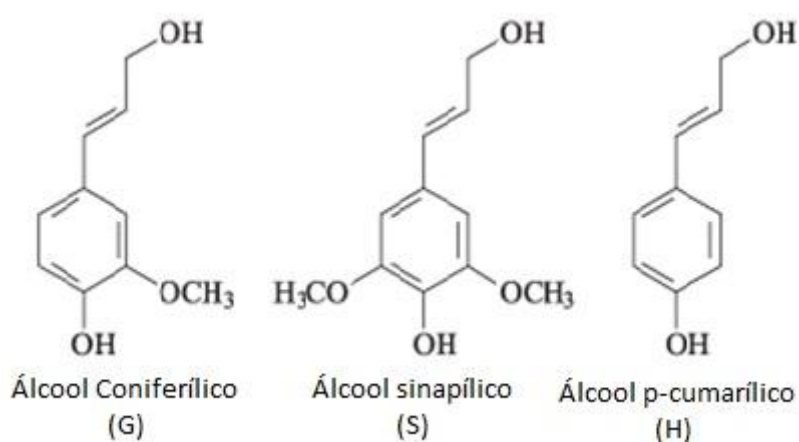


Figura 3. Alcoóis precursores das unidades fenilpropanóidesguaiacila (G), siringila (S) e *p*-hidroxifenila (H) (BARBOSA et al., 2008).

A função da lignina é preencher os espaços entre a celulose e a hemicelulose ligando-se de forma covalente a hemicelulose como já mencionado (Figura 4). Além de aumentar a resistência física devido às ligações cruzadas que faz com os diversos polissacarídeos, a lignina confere à parede celular grande resistência à degradação bioquímica pelo seu caráter hidrofóbico (NAKAI, 2014).

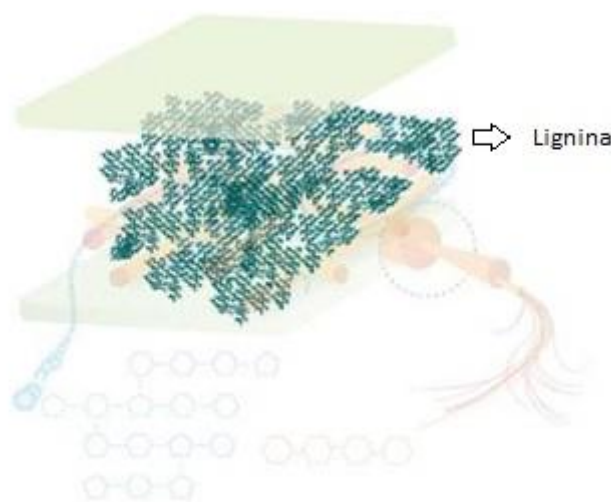


Figura 4. Localização da lignina dentro da parede celular vegetal, preenchendo os espaços entre a celulose e hemicelulose (Adaptado de NAKAY, 2014).

Os extrativos representam 2,5 a 5% da composição da madeira e as cinzas com menos de 0,5%, completam a análise total da madeira.

A idade da árvore, assim com a variedade de solvente utilizado para a extração desses extrativos e a época do ano em que a madeira foi colhida, são fatores que afetam a quantidade de extrativos determinados. A fração dos extrativos de mais baixa polaridade, incluindo “gorduras” e “ceras” é, no geral pequena. Este extrato removido, por exemplo, por diclorometano, tem valores abaixo de 1%, tipicamente próximos de 0,5%. Quando feitos sequencialmente, e após a remoção do extrato pelo diclorometano, os extrativos em etanol variam na maioria das análises entre 1,5 e 3% e em água entre 2 e 3,5% (REVISTA DA MADEIRA, 2010).

O conjunto celulose, hemicelulose e lignina formam a parede celular dos vegetais (Figura 5). Seus graus de polimerização, composição (no caso da hemicelulose e lignina) e principalmente suas proporções definem as características

mais importantes para os processos termoquímicos que aplicam a biomassa (NAKAI, 2014).

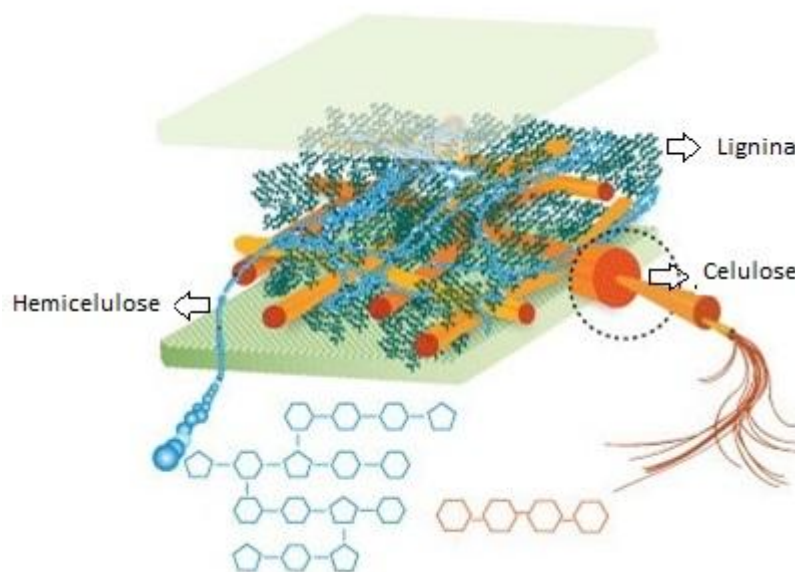


Figura 5. Parede celular vegetal com seus três principais constituintes: (laranja) celulose, (azul) hemicelulose e (verde) lignina (Adaptado de NAKAY, 2014).

2.3. Caracterização da Biomassa

O projeto de sistemas específicos para o emprego de biomassa com fins energéticos requer um pleno conhecimento das propriedades físicas e químicas do biocombustível. Desta forma, quatro classes de procedimentos são fundamentais para avaliar o potencial energético do eucalipto. São elas a técnica do poder calorífico, análise imediata (teor de umidade, quantidade de carbono fixo e teor de cinzas), análise elementar e granulometria (SÁNCHEZ, 2010).

2.3.1. Poder Calorífico

O poder calorífico se refere a quantidade de energia liberada por unidade de massa liberada na oxidação de um determinado combustível. Esse potencial pode ser determinado utilizando a técnica da bomba calorimétrica.

Para medir este valor, considera-se o calor latente de condensação para todo o vapor de água formado pela combustão do hidrogênio presente no combustível para o

PCS (poder calorífico superior), mas quando este não é condensado, tem-se o PCI (poder calorífico inferior) do combustível. Como no ambiente de combustão o vapor de água não se condensa e todo o produto da combustão do hidrogênio, permanece em estado de vapor, na prática, adota-se nos cálculos o poder calorífico inferior (LOPES, 2002).

Tabela 2. Poder calorífico da biomassa, em kJ/kg(base seca).

Biomassa	Poder Calorífico Superior kJ/kg
Pinus ¹	20.020
Eucalipto ²	19.420
Casca de eucalipto ³	17.580
Carvão ⁴	30.900

Fontes: ¹ = LORA eat. AI (1997), ² = Nakai (2014), ³ = REDEENERGIA (2005), ⁴ = LOPES (2002).

2.3.2. Análise Elementar

A análise elementar é uma técnica que permite a identificação, em porcentagens, da quantidade de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, assim como enxofre, cloro e bromo, em compostos orgânicos e inorgânicos, sejam eles sólidos ou líquidos. Para a biomassa *Eucayptus*, os principais elementos a serem determinados são o carbono, hidrogênio e oxigênio.

A análise elementar da madeira tem mostrado, para diferentes espécies, uma uniformidade em sua composição. A tabela 3 apresenta a composição elementar de diferentes biomassas.

Tabela 3. Composição elementar típica da madeira e casca.

Composição Elementar (%)					
Biomassa	H	C	N	O	S
Madeira não-resinosa	6,4	50,8	0,4	41,8	-
Casca não-resinosa	6,0	51,2	0,4	34,8	-
Madeira resinosa	6,3	52,9	0,1	39,7	-
Casca resinosa	5,9	53,1	0,2	37,9	-

FONTE: BARRICHELO (1978).

2.3.3. Análise Imediata

A análise imediata fornece as frações em peso de umidades, voláteis, carbono fixo e cinzas de uma amostra de biomassa. A análise de umidade deve ser a primeira

análise a ser realizada sendo essa uma das variáveis principais para a melhor escolha do tipo de processo a ser utilizado. Esse método consiste na secagem das amostras em um forno de circulação natural de ar a uma temperatura entre 104 °C e 108 °C até que não ocorra mais variação de peso. O tempo de secagem vai variar dependendo do tamanho das partículas da amostra.

Tabela 4. Análise imediata realizada para três diferentes tipos de eucalipto.

Espécie	Medido		
	Voláteis	Carbono fixo	Cinzas
<i>E. urophylla</i>	87,34 ± 0,53%	11,66% ± 0,54%	0,40% ± 0,04%
<i>E. grandis</i>	88,48% ± 0,58%	11,15% ± 0,59%	0,37% ± 0,05%
<i>E. urograndis</i>	88,34% ± 0,28%	11,20% ± 0,29%	0,47% ± 0,07%

Fonte: NAKAI(2014).

2.3.4. Granulometria

A distribuição granulométrica das partículas a serem tratadas é muito importante para a gaseificação, pois esta informação definirá as condições de operação e os equipamentos que levarão à granulometria desejada do produto, como também será utilizada para o cálculo da energia dispensada para produzi-lo (VALADÃO et al., 2007).

Por meio desta técnica se obtém as frações, em peso, de cada dimensão característica que compõe a biomassa. Esses fatores são necessários para o dimensionamento do alimentador e da velocidade superficial do gás. Esse processo é realizado por um conjunto de peneiras padronizadas conforme a NBR 6922 (ABNT, 1983).

2.4. Tecnologia de Aproveitamento de Biomassa

Atualmente, muitas são as tecnologias de conversão de biomassa, no qual, são conhecidas a combustão direta, cogeração, craqueamento, digestão anaeróbia, fermentação, gaseificação, hidrólise, liquefação, pirólise e transesterificação. Cada uma dessas tecnologias está associada a um produto final. A combustão direta, por exemplo, tem como principal finalidade a produção de calor, enquanto que a digestão anaeróbia é responsável pelo biogás e a gaseificação pelo gás de síntese, etc. Uma das tecnologias que vem ganhando cada vez mais espaço nesse contexto é a gaseificação,

devido a possibilidade de uma vasta gama de uso do gás de síntese produzido (CENBIO, 2014).

2.5. Gaseificação

A gaseificação vem se tornando uma tecnologia promissora para utilização de biomassa e outros resíduos, devido ao baixo impacto causado ao meio ambiente e a redução das emissões globais de CO₂ (CAMPOY et al., 2009). Esta tecnologia pode ser definida como a conversão de qualquer combustível sólido em um gás energético, pela oxidação parcial a temperaturas elevadas (800 - 1000 °C). Esta conversão pode ser realizada através da utilização de diferentes reatores sendo eles: leito fixo e leito fluidizado. O gás proveniente da gaseificação possui muitas aplicações práticas, desde a combustão em motores ou em turbinas para geração de potência e energia elétrica, em bombas de irrigação, na geração direta de calor em queimadores e fornalhas, ou como fonte para a produção de matéria-prima em sínteses químicas (SÁNCHEZ, 2010).

O processo de gaseificação de biomassa resulta em complexas reações, na qual podemos classificá-las em cinco etapas (VIEIRA, 2005):

I) Etapa de pirólise ou decomposição térmica que se desenvolve a temperaturas próximas de 600 °C.

II) Oxidação de parte do carbono fixo do combustível, método que constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação.

III) Gaseificação que inclui reações heterogêneas entre os gases e o coque residual, assim como reações homogêneas entre os produtos formados.

IV) Craqueamento do alcatrão no qual ocorre a quebra das moléculas dos compostos que compõem o alcatrão formando CO, CO₂ e CH₄ entre outros produtos.

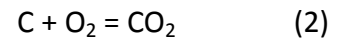
V) Oxidação parcial dos produtos de pirólise.

As reações envolvidas mais importantes são (COELHO et al, 2002):

1) Pirólise

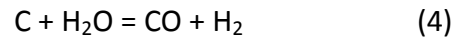
Biomassa + Calor → Coque + Gases + Alcatrão + Condensáveis

2) Oxidação do carbono

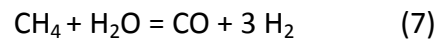


3) Gaseificação

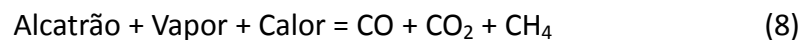
- Reações heterogêneas



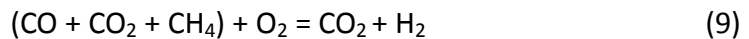
- Reações homogêneas



4) Craqueamento do Alcatrão



5) Oxidação parcial dos produtos da pirólise



São muitas as circunstâncias em que a gaseificação de biomassa apresenta vantagens em relação a queima direta da biomassa ou de combustíveis fósseis. Entre estas está a geração de eletricidade em pequena escala sem a necessidade de um ciclo a vapor, apenas pela queima do gás em um motor de combustão interna. Entretanto, há desvantagens técnicas como a utilização de uma tecnologia mais complexa do que a da queima direta de biomassa, por exemplo.

De um modo geral, a instalação de um sistema de gaseificação é constituída por:

- Sistema de pré-processamento do combustível como estoque, transporte, redução da biomassa ao tamanho adequado e processo de secagem quando for necessário.
- Gaseificador, dotado de seção de alimentação apropriada para não haver vazamento de gás.

- Sistema de tratamento do gás, com resfriamento e limpeza.
- Sistema de controle do processo de gaseificação.
- Sistema de tratamento dos resíduos, com disposição adequada.

2.5.1. Tipos de Gaseificadores

Um gaseificador deve ser capaz de produzir um gás combustível limpo e de alta qualidade a partir de uma larga variedade de combustíveis. Diversos são os designs e tecnologias de gaseificadores que já estudados ou desenvolvidos para a conversão de biomassa. A maioria já foi comercializada para a produção de calor, energia elétrica a partir do gás de síntese ou ainda para produção de combustíveis líquidos. As principais diferenças entre esses gaseificadores são as seguintes (NNFCC, 2009):

- A alimentação da biomassa no reator e como essa se move dentro do mesmo.
- Tipo de atmosfera utilizada. Oxigênio, ar ou vapor são utilizados como oxidantes.
- A alimentação no reator e como essa se move dentro do reator.
- Range de temperatura de operação do gaseificador.
- Fornecimento de calor para o reator (direta ou indiretamente).

A classificação mais utilizada para definir os tipos de gaseificadores é dada pela direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação (contra fluxo ou contracorrente, fluxo direto ou concorrente, fluxo cruzado e leito fluidizado) (SÁNCHEZ, 2010).

2.5.1.1. Gaseificadores contracorrente

O gaseificador do tipo contracorrente (Figura 6), dentre todos os outros, possui uma forma construtiva mais simples na qual a entrada de ar fica na parte de baixo do gaseificador, com o fluxo ascendente de gases, contrário ao fluxo de combustíveis que é introduzido pela parte superior e desce pela ação da gravidade conforme é

consumido na zona de combustão. Sua eficiência térmica é alta e sua característica principal é a simplicidade, possuindo a desvantagem de produzir um gás com muito vapor de água e alcatrão. Estes gaseificadores podem utilizar uma larga variedade de combustíveis como resíduos agrícolas e municipais. Pelo fato do gás produzido conter grandes quantidades de alcatrões e voláteis, o gás é normalmente utilizado em queimadores para aquecimento direto.

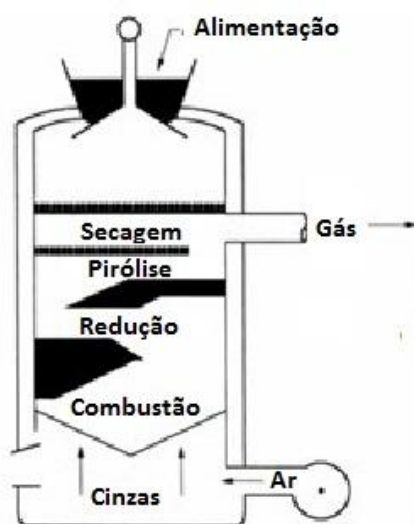


Figura 6. Gaseificador contracorrente (MCKENDRY, 2002).

2.5.1.2. Gaseificadores concorrentes

Os gaseificadores concorrentes (Figura 7) possuem a zona de combustão e redução contrárias aos gaseificadores contracorrentes. O material carbonoso é inserido no topo do reator e o ar é alimentado em fluxo descendente (mesmo sentido do fluxo de combustível) passando pelas zonas de combustão e redução, acima da grelha, enquanto que o gás combustível de alta qualidade é retirado abaixo da grelha.

A vantagem principal deste tipo de reator está na possibilidade de se obter gás livre de alcatrões, já que estes passam pela zona de combustão e são convertidos em compostos mais leves. Já a desvantagem é que este reator não é apropriado para combustíveis com alto teor de cinzas.

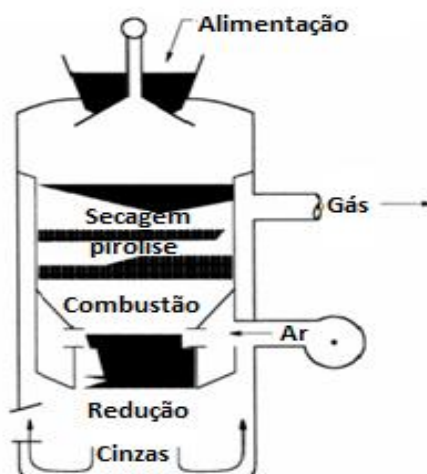


Figura 7. Gaseificador concorrente (MCKENDRY, 2002).

2.5.1.3. Gaseificadores de Fluxo Cruzado

Os gaseificadores de fluxo cruzado (Figura 8) apresentam um injetor que direciona o ar no centro da zona de combustão. Os gases são retirados pelo lado oposto ao da entrada de ar no mesmo nível. Caracterizam-se por possuir um gás combustível com propriedades intermediárias entre os gaseificadores contracorrentes e concorrentes. O tempo de residência dos gases no interior do gaseificador é muito curto, com isso, combustíveis com altos teores de voláteis não são apropriados para esse tipo de processo já que estes produzirão grande quantidade de alcatrão, sendo o carvão o combustível mais apropriado para a utilização deste tipo de reator de gaseificação (RENDEIRO et al., 2008).

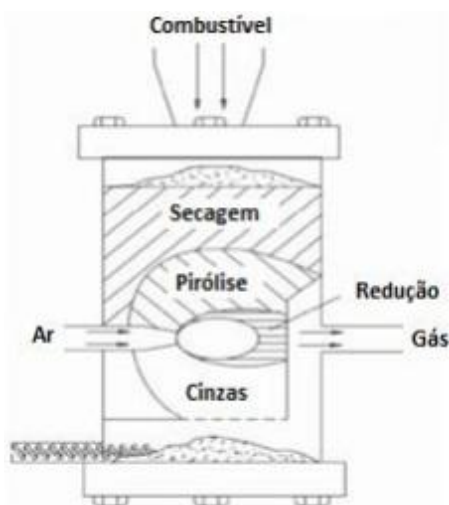


Figura 8. Gaseificador de fluxo cruzado (OLOFSSON et al., 2005).

2.5.1.4. Gaseificadores de Leito Fluidizado

Um gaseificador de leito fluidizado (Figura 9) consiste de um reator vertical que possui, em seu interior, uma mistura de combustíveis particuláveis e, quando necessário, de material inerte suportada por uma placa distribuidora. O agente gaseificante que é previamente pressurizado é obrigado a atravessar a placa distribuidora no sentido ascendente e em quantidade suficiente pra conseguir que a força de arraste do escoamento do fluido supere o peso dos sólidos do leito e promova, simultaneamente, a queima parcial do combustível (SÁNCHEZ, 2010).

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser de leito borbulhante ou de leito circulante. O que diferencia esse dois tipos de processo é a velocidade com que o material vem a atravessar o leito.

Os reatores utilizados para a gaseificação a partir do leito fluidizado apresentam uma capacidade por unidade de área transversal maior quando comparado aos outros tipos de gaseificadores, que, por sua vez, pode apresentar uma maior capacidade por unidade de volume. Eles são reconhecidos por ser mais flexíveis com relação a utilização de combustíveis alimentados, mas não podem ser considerados capazes de trabalhar com todo e qualquer tipo de combustível. Combustão de biomassa a partir de um gaseificador de leito fluidizado vem sendo amplamente utilizado devido a sua característica de poder operar com combustíveis com alto percentual de umidade (CENBIO, 2014).

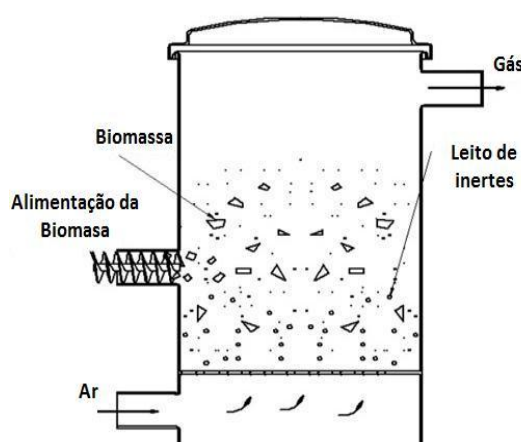


Figura 9. Gaseificador de leito fluidizado (GAZZONI, 2000).

2.6. Balanços de Massa e Energia do Sistema

Considerando o balanço de massa e energia para um gaseificador do tipo concorrente, tem-se:

2.6.1. Balanço de Massas

Algumas hipóteses importantes precisam ser assumidas para se determinar o balanço de massa e energia, sendo elas (SÁNCHEZ, 2010):

- A matéria prima é homogênea.
- Não ocorrerá variação significativa na composição do gás.
- As taxas de matéria-prima e liberação de rejeitos e subprodutos são assumidas como constantes, mesmo que a alimentação e a retirada dos rejeitos sejam realizadas intermitentemente.

O princípio de conservação de massa para um volume de controle assegura que a diferença entre as massas que entram e saem deste volume devem corresponder exatamente à variação de massa no interior do volume de controle, porque massa não se cria nem se destrói.

A expressão 10 é uma contabilidade dos fluxos de massa. Indica que a variação de massa dentro do volume de controle durante o intervalo de tempo Δt é igual à quantidade de massa que entra menos a quantidade de massa que sai do volume de controle.

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_{ie} - \sum \dot{m}_{is} \quad (10)$$

Onde,

$\frac{dm_{vc}}{dt}$ = Variação da quantidade de massa no volume de controle.

$\sum \dot{m}_{ie} - \sum \dot{m}_{is}$ = Soma das vazões mássicas na entrada e saída, respectivamente.

Para volumes de controle em regime permanente, isto é, quando existe escoamento, mas sem qualquer variação no tempo, não ocorrem variações de massa

no interior do volume de controle. Nestas condições, a soma das massas que entram é igual à soma das massas que saem. Portanto, vale a equação 11.

$$\sum m_{ie} = \sum m_{is} \quad (11)$$

2.6.2. Balanço de Energia

De um modo geral, considera-se o gaseificador com um reator, com isso, a energia liberada nas reações tem a finalidade de manter a temperatura do reator no valor desejado para favorecer as reações de gaseificação. Assim, a primeira lei da termodinâmica aplicada ao reator gaseificador nos fornece (SÁNCHEZ, 2010):

$$m_{ar}h_{ar} + m_c h_c + m_{água} h_{água} + m_c PCS_c = \sum m_g h_g + \sum m_g PCS_g + Q_p \quad (12)$$

Onde,

$m_{ar}, m_c, m_{água}$ = Descarga do ar de gaseificação, do combustível, da unidade contida no combustível, respectivamente (kg/s).

m_g = Descarga de cada componente do gás produto (kg/s).

$h_{ar}, h_c, h_{água}$ = Entalpia do ar de gaseificação do combustível e da água (umidade do combustível, respectivamente (J/kg).

h_g = Entalpia de cada componente do gás produto (J/kg).

PCS_c = Poder calorífico superior da cada componente do gás produzido (J/kg).

Q_p = Calor perdido ao ambiente (J/kg).

O balanço de massa e energia de um sistema é fundamental para a análise do projeto de um novo processo, bem como de um processo já existente. Assim, através das variáveis encontradas é possível prever ou calcular diversos fatores. No caso da gaseificação de eucalipto em reator de fluxo concorrente, o balanço de massa pode prever a vazão de gás e cinza assim como a quantidade alcatrão, caso gere em quantidades significativas assim como, a partir desses dados, prever a quantidade de material que foi inserido no gaseificador.

2.7. Estudos da Gaseificação de Biomassa para fins de Geração de Energia

Figueiredo(2012), em seu trabalho, apresenta a avaliação de uma planta piloto de gaseificação em leito fixo concorrente de duplo estágio (Figura 10) utilizando lenha de eucalipto como substrato na geração do gás combustível para a alimentação do motor da marca MWM convertido para ciclo Otto e de 50 kVA, tendo como produto final a produção de energia elétrica.

O agente gaseificador (ar) é injetado em duas regiões do gaseificador onde se cria duas zonas de alta temperatura, através dos quais os voláteis, da região de pirólise, devem passar, provocando o craqueamento térmico do alcatrão tornando o gás de síntese mais limpo. O ar é injetado no gaseificador, por meio de um soprador de 3405 rpm e regulado por uma válvula de acordo com a variação da pressão em centímetros de coluna d'água, variando de 2,6 a 3,1 cm H₂O.

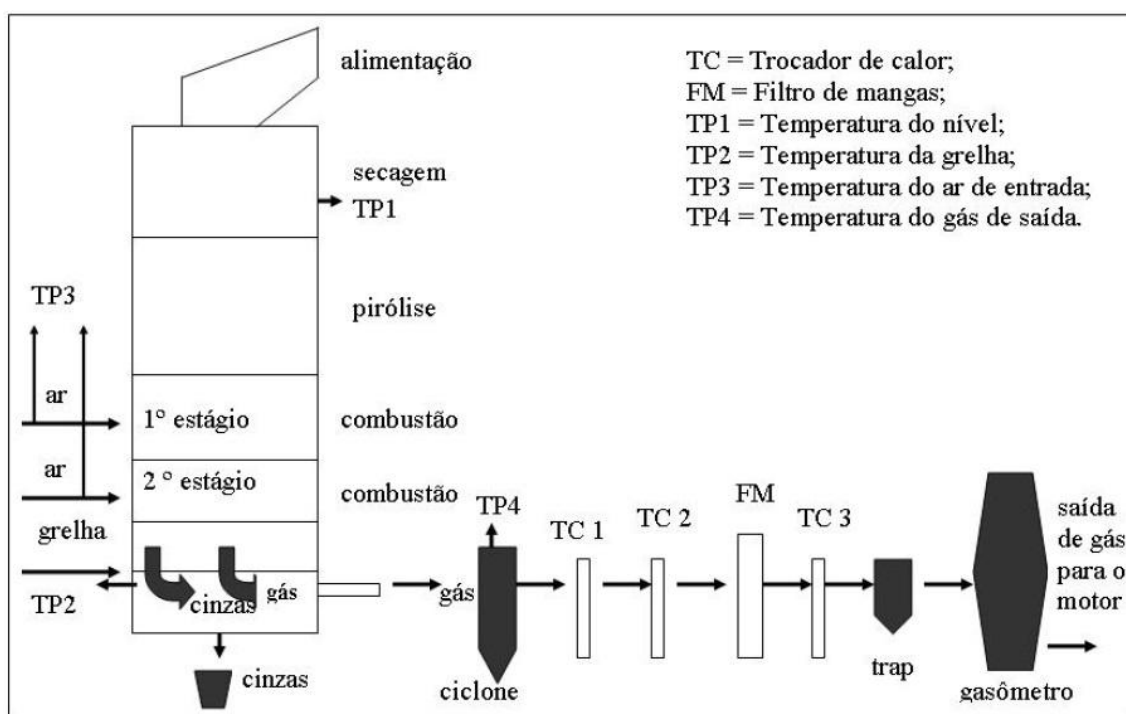


Figura 10. Gaseificador de leito fixo do tipo concorrente de duplo estágio de gaseificação (FIGUEIREDO, 2012).

No gás de síntese produzido, a média dos gases, em porcentagem foi de 16,9 % de H₂, 0,1 % de O₂, 50,1 % de N₂, 20,0 % de CO, 10,9 % de CO₂ e 2,0 % de CH₄; as concentrações de H₂O foram detectadas na composição do gás proveniente da umidade da própria biomassa após o gasômetro. Considerando que o ar injetado no

gaseificador foi o ambiente, esta concentração é considerada alta, por se tratar de um gás combustível; já para o nitrogênio a quantidade também é alta, em comparação com o gás natural veicular (GNV) que é de no máximo 3 %, e, por ser inerte, não contribui positivamente com o poder calorífico do gás de síntese.

O gaseificador produziu a quantidade de gás suficiente para suprir a demanda do grupo gerador em potência máxima de 26,4 kW sendo que o grupo gerador apresentou bom desempenho utilizando o gás de síntese, sem distorções na qualidade da energia gerada para potência máxima desenvolvida de 26,4 kW de potência ativa.

A tensão se manteve estável, dentro dos padrões fixados pela Companhia Paranaense de Energia (COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 1999), variando somente entre 222 e 223 V, sendo permitida a variação entre 221 a 229 V.

O projeto de um grupo de pesquisadores da UFAM, coordenados pelo professor Atlas Augusto Bacellar, em Manaus, visou desenvolver um modelo de negócio de energia elétrica em comunidades isoladas da Amazônia, utilizando gás combustível a partir da gaseificação do caroço de açaí, na comunidade de São Francisco do Paroá, as margens do Rio Solimões, no estado do Amazonas. Para produzir energia elétrica para a comunidade, foi utilizado um gaseificador com dois geradores de 40 kVA cada. A gaseificação dada a partir do caroço de açaí permitiu não somente a produção de energia na região como também, a implantação de uma pequena agroindústria de polpa de açaí, aumentando assim, a geração de renda da comunidade. A usina e a agroindústria são administradas por uma cooperativa que é responsável pela venda da energia para a concessionária local, no caso a Companhia de Eletricidade do Amazonas – CEAM, que, por sua vez, fará a distribuição e comercialização de energia elétrica.

O gaseificador utilizado se mostrou promissor na geração de energia elétrica, porém apresentou alguns problemas de segurança.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização da Região de Estudo

São Luiz do Paraitinga é um município do estado de São Paulo, Brasil. Sua população se encontra estipulada em 10.397 habitantes (Censo 2010) e sua área total é de aproximadamente 617 km² (SÃO LUIS DO PARAITINGA SP, 2014).

A região de São Luis de Paraitinga possui uma topografia montanhosa serrana, de clima temperado com inverno seco e índice pluviométrico de 1.300 (mm/ano). Essa região também é caracterizada pelas grandes extensões de solos profundos, bem drenados, de baixa fertilidade natural, porém com características físicas favoráveis, além das condições topográficas que permitem a franca localização das lavouras (GEOBRASIL, 2014).



Figura 11. Região de localização de exploração e utilização do eucalipto (Wikipédia,2014).

3.1.1. Justificativa para a Escolha da Área

São Luiz do Paraitinga é considerado patrimônio histórico da humanidade. Esse título foi conquistado graças à arquitetura histórica da cidade que abriga várias casas do século XIX. Além de toda a sua atração histórica, um de seus principais atrativos da cidade é o carnaval de marchinhas que atrai todos os anos milhares de foliões para curtir o carnaval de blocos em um cenário de ruas, ladeiras, praças e casarões com

arquitetura do século XIX. O carnaval é o principal evento anual, porém a cidade concentra festas importantes todos os meses, estando assim, sempre muito movimentada (SÃO LUIS DO PARAITINGA SP, 2014).

Quando se avalia os vários fatores relacionados à região, São Luis do Paraitinga apresenta uma região promissora na gaseificação. Isso pode ser explicado pela sua localização como mostrado na figura 12.



Figura 12. Imagem de satélite de São Luis do Paraitinga (GOOGLE MAPS, 2014).

A região onde se encontra as casas (massas marrons) é referente a cidade de São Luis do Paraitinga. Como se pode observar, a cidade é rodeada de plantações de eucalipto (massas verdes mais escuras), sendo a plantação de eucalipto escolhida, apenas uma pequena parcela de tantas outras que existem na região.

Apesar de todas estas festas movimentarem muito o turismo e consequentemente, a economia local, São Luis do Paraitinga é afetada principalmente nas épocas de festas, com a falta de abastecimento de água e energia devido ao grande fluxo de pessoas que passam por ela.

Visando propor uma solução parcial para esta problemática, estabeleceu-se uma linha de pesquisa voltada para a utilização do eucalipto como fonte de combustível para a geração de energia elétrica na cidade.

Uma região com 21.200 pés de eucalipto da espécie *Urograndis* (Figura 13) com idades entre 4 e 5 anos, plantados em uma área de 21 hectares foi escolhida nas proximidades de São Luis do Paraitinga, exatamente a 15 km do centro da cidade, e a 2 km do asfalto.



Figura 13. Delineamento da região de estudo (RICARDO, 2014).

3.2. Descrição do sistema de geração

O processo de geração de energia é determinado por etapas importantes que vão desde a colheita da biomassa até a chegada da eletricidade no seu destino final, lembrando a necessidade de replantar e devolver a natureza, aquilo que foi retirado. O diagrama de blocos apresentado na Figura 14 representa a ordem e as etapas, de um modo geral, do processo de produção de energia a partir da gaseificação da madeira de eucalipto.

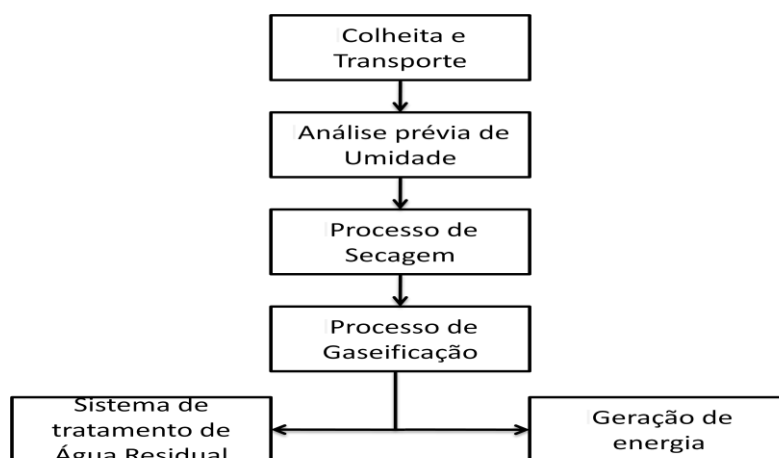


Figura 14. Diagrama de blocos do processo de geração de energia a partir da madeira de eucalipto.

O processo de conversão energética escolhido para utilização da biomassa eucalipto foi o processo de gaseificação utilizando um gaseificador de fluxo concorrente. O sistema apresentado na Figura 15 foi escolhido com base em um estudo de gaseificação para geração de energia elétrica em comunidades isoladas, apresentado pela engenheira Sandra M. Apolinário, em forma de artigo científico (APOLINÁRIO, 2004).

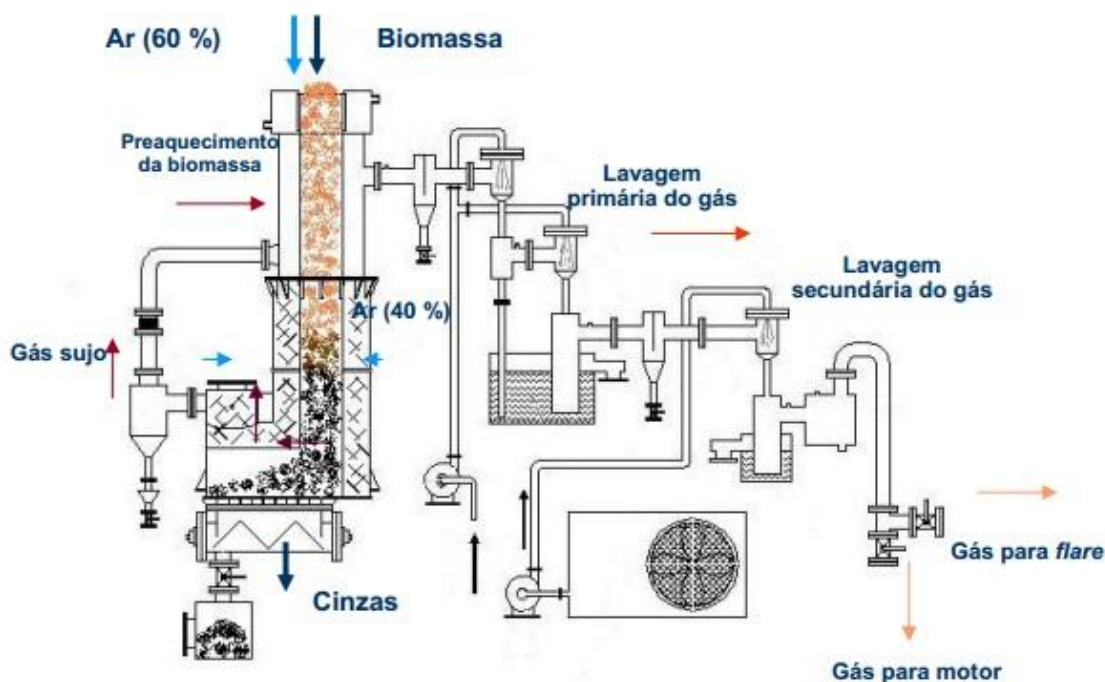


Figura 15. Esquema do gaseificador importado do IIS (APOLINÁRIO, 2004).

O sistema de gaseificação é composto por um sistema que contém um gaseificador de 20 kW, extrator de cinzas, sistema de tratamento e resfriamento de água, gerador (motor de combustão interna a diesel de 20 kW da marca MWM e alternador), secador de biomassa e painel de controle. O gaseificador importado do IndianInstituteof Science (IIS) é do tipo concorrente estratificado, ou seja, o escoamento do combustível sólido segue na mesma direção e sentido do gás. As correntes de biomassa e de ar entram pelo topo do gaseificador, que é aberto à atmosfera (“open top”) seguindo para a base.

O gaseificador opera com uma pressão ligeiramente inferior à atmosférica, suficiente para garantir, através de depressão, o escoamento de gases através da carga

de biomassa. Ele pode ser dividido em três partes principais: gaseificador, sistema de lavagem primário e sistema de lavagem secundário do gás.

Alguns acessórios são imprescindíveis para a utilização do gaseificador a fim de controlar temperatura, pressão e vazão do gás. São eles: 4 termopares (T1, T2, T3 e T4), 3 transdutores de pressão (P1, P2 e P3) e uma placa de orifício, esta última para determinação da vazão de gás gerado. Os teores de alcatrão e de material particulado nos gases são medidos em dois pontos, identificados como PAM 1 e PAM 2 na Figura 16. O primeiro ponto está localizado antes do sistema de limpeza de gases e o segundo, após.

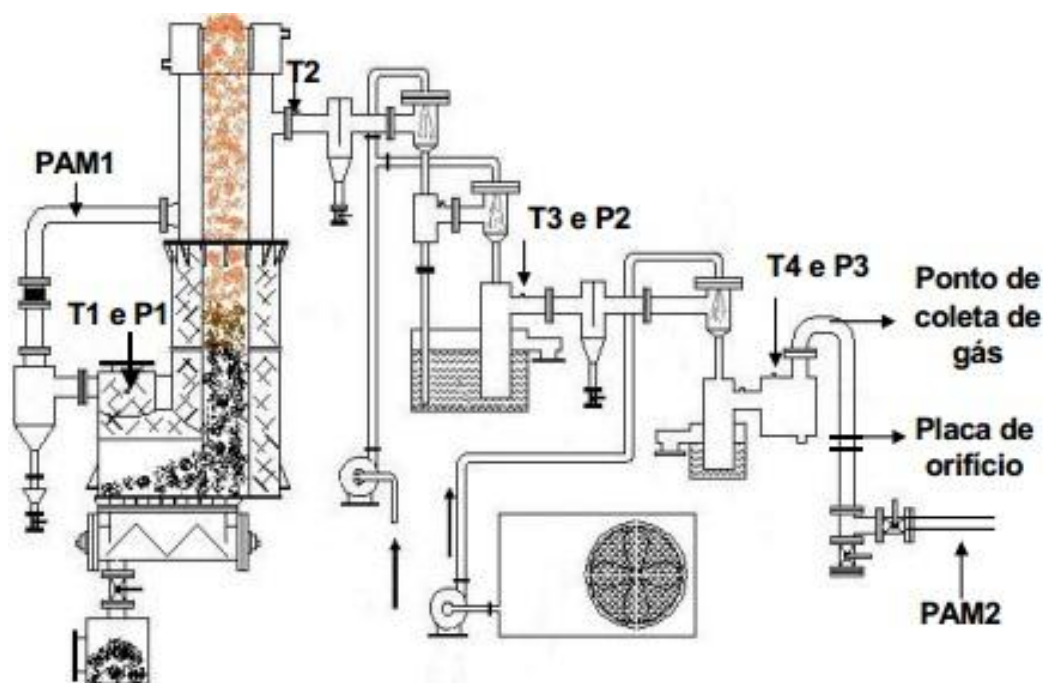


Figura 16. Localização da instrumentação instalada no gaseificador (APOLINÁRIO, 2004).



Figura 17. Gaseificador utilizado para a produção de gás de síntese, que irá abastecer os motores para a geração de energia elétrica (APOLINÁRIO, 2004).

O gás produzido na gaseificação da biomassa possui contaminantes tais como particulados, alcatrão, sulfetos de hidrogênio e amônia. Estes devem ser retirados a fim de melhorar a qualidade do gás e a segurança do processo como um todo. O gaseificador do tipo concorrente apresenta uma quantidade de alcatrão inferior ao produzido pelo gaseificador contracorrente, porém, há uma produção bem elevada de particulados que precisam ser retirados. Esses particulados são considerados carvão semi ativados e que podem ser reutilizados para outros processos como o tratamento de água residual. Desta forma, até os produtos indesejados podem ser aproveitados para produção de outros tipos de processo, o que torna o processo muito rentável quando a questão é a conversão geral da biomassa.

3.3. Análise Econômica

No contexto da análise econômica, é importante levar em consideração os custos necessários para implantar e operar o sistema de geração de energia elétrica a partir da gaseificação, assim como todas as variáveis que influenciam seu funcionamento, onde serão levados em conta:

1) Custo de implantação da planta: valor do equipamento, custo do combustível, consumo específico do motor operando com gás, tempo de utilização do equipamento e depreciação do mesmo.

2) Custos de reflorestamento: elaboração de projeto, limpeza da área, preparação do solo, combate a formigas, alinhamento e balizamento, fertilização, mistura e distribuição de corretivos, plantio e replantio de mudas e irrigação.

3) Custos de colheita e transporte.

3.3.1. Custos de Implantação da Planta

O levantamento de custos associados à implantação de eletricidade e secagem do insumo energético apresentou um investimento inicial de aproximadamente R\$ 219.995,20. Esse valor foi anualizado adotando-se uma taxa de juros de 12 % ao ano e uma vida útil de 5 anos, de acordo com FREITAS et al., (2006).

$$C_{ea} = c_e \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} \quad (13)$$

Onde,

C_{ea} = Custo do equipamento anualizado(em R\$).

C_e = Custo do equipamento(em R\$).

i = Taxa de juros(%).

n = Vida útil do equipamento(em anos).

Levando em conta que, é necessário um local de acomodação do equipamento, o que de fato, não se é conhecido, partiremos do princípio que este será fornecido pela prefeitura sem custos pré-estabelecidos, já que, a princípio todo o equipamento incluindo secador, gaseificador e motor podem ser acomodados em um local relativamente pequeno podendo ser na própria prefeitura.

Segundo a literatura, as despesas com manutenção do equipamento correspondem a 5 % do valor total do mesmo. A contratação de trabalhadores para operar o equipamento será baseada em turnos 3 turnos de 8h quando a geração se der

ao longo de todo o ano e, em 2 turnos de 12h caso o processo de geração de energia escolhido seja de aproximadamente 5 dias ao mês. Para isso, sugere-se a contratação de dois funcionários por turno, um técnico e um operacional. Outras duas hipóteses ainda serão levadas em conta onde, o processo de geração de energia se dará num período de 8h durante todo o ano e durante 5 dias mês para efeito de comparação. Desta forma, os custos de operação e manutenção podem ser obtidos pela seguinte equação (FREITAS et al., 2006):

$$C_{O\&M} = 0,05 * C_e + (12 * R_t * N_t) \quad (14)$$

Onde,

$C_{O\&M}$ = Custo de operação e manutenção do equipamento(R\$/ano).

C_e = Custo do equipamento(R\$).

R_t = Remuneração de cada trabalhador(R\$/trab).

N_t = Número de trabalhadores

A quantidade de energia elétrica gerada anualmente pode ser calculada através da seguinte equação:

$$Q_{energia} = N_{du} * 24 * P_g * F_c \quad (15)$$

Onde,

$Q_{energia}$ = Quantidade de energia elétrica gerada(kW/ano).

N_{du} = Número de dias de utilização do equipamento (dias).

P_g = Potencia do carregador(kW).

F_c = Fator de carga (adimensional)

Ao final do processo, o preço por kW será estabelecido de acordo com a soma dos custos de operação, manutenção e equipamento anual com base na quantidade de energia total gerada.

3.3.2. Custos de Reflorestamento

Segundo Higa et al., (2000), espaçamentos entre as árvores menores como 3mx1,5m podem ser usados para a produção de lenha sem problemas. Isso é de fato um ponto positivo para a produção de eucalipto em questão da quantidade de árvores que podem ser plantadas a mais em uma determinada área quando comparadas com espaçamentos maiores, porém implica em um custo a mais no reflorestamento, colheita e transporte.

3.3.2.1. Estimação da Área Basal, Volume e Biomassa por hectare

As estimações de área basal, volume e biomassa por hectare (dendrometria) são dados importantes que irão fornecer características das árvores que serão utilizadas para calcular a quantidade total em peso ou volume das árvores presentes na área a ser explorada. A partir desses dados é possível obter com uma boa exatidão, os cálculos de colheita e transporte. É importante salientar que os dados obtidos com esses cálculos teóricos, no caso deste estudo devem ser aproximados ao máximo com a idade corretada árvore assim como a sua espécie em questão.

A área basal/hectare (bom indicador de densidade de vegetação) é determinada de acordo com dados obtidos com a altura total e o diâmetro (DAP) de cada árvore, através da seguinte equação (MULLER, 2005):

$$B = \frac{\pi(DAP)^2}{4} \quad (16)$$

Onde,

B = (m²/ ha).

DAP = Diâmetro à altura do peito, 1,30 m do solo.

O volume de cada árvore pode ser obtido pela equação:

$$V = \frac{\pi}{80000} (D_1^2 + D_2^2)L \quad (17)$$

Onde,

V = (m³).

D_1 = Diâmetro da base em centímetros(cm).

D_2 = Diâmetro a 50% do comprimento do tronco(cm).

L = Comprimento do tronco(cm).

A biomassa de madeira/hectare pode ser obtida pela multiplicação do valor do volume (m^3 / ha) pela densidade da madeira.

3.3.2.2. Quantidade de Energia por Hectare e Área Necessária em Função da Potência Instalada

A quantidade de energia por hectare (kcal/ha) pode ser baseada no cálculo da massa da madeira seca multiplicada pelo poder calorífico da mesma. A quantidade do volume da madeira e biomassa, assim como o poder calorífico, são fatores muito importantes para a determinação da área necessária para abastecer uma unidade de geração (kW gerado).

A área necessária para atender a demanda de lenha em função da potência instalada é calculada dividindo-se o consumo de lenha pela produção (ton/ha).

3.3.3. Custos de colheita e transporte

O sistema de colheita de madeiras em geral, pode ser determinado por 6 atividades básicas que, correspondem a (SOUZA et al., 2009):

- 1) Corte: compreende as operações de derrubada, desgalhamento, traçamento das árvores em toras ou toretes e empilhamento da madeira.
- 2) Descasque: separação da casca do tronco, em razão das necessidades do produto final, sendo uma atividade opcional e/ou não necessária para todos os tipos de processo.
- 3) Extração: transporte da madeira do local de corte até a beira da estrada, carregador ou pátio intermediário, de onde é transferida para os veículos que fazem o transporte final até as fontes consumidoras.

- 4) Carregamento: representa a colocação da madeira extraída nos veículos que a transportam até o local de utilização final ou pátios especiais.
- 5) Transporte às fontes consumidoras: consiste no transporte da madeira coletada da floresta até o centro de consumo.
- 6) Descarregamento: última etapa da cadeia de produção; corresponde à retirada da madeira do veículo de transporte e sua colocação no pátio da empresa consumidora.

Considerando que o serviço de colheita e de transporte será realizado por uma empresa terceirizada, o serviço será cobrado da empresa cliente por metro cúbico (m^3) de madeira extraída; assim, a atividade tem como parâmetro físico a quantidade de m^3 de madeira transportada do local de corte até a beira da estrada, onde, posteriormente, será transferida para os caminhões que as levarão até o seu destino final. Segundo Souza et al., (2009), a colheita florestal é um processo que possui variáveis que devem ser consideradas na mensuração e análise dos custos incorridos, entre elas:

- 1) Volume individual das árvores.
- 2) Distância do transporte, sendo esta a variável mais importante na atividade de extração, pois quanto maior a distância entre o local onde as árvores estão e a beira da estrada, para onde devem ser transportadas, menor é o número de viagens realizadas durante o período de trabalho.
- 3) Comprimento das toras.
- 4) Características do terreno e condições climáticas.
- 5) Modelo dos equipamentos.

Atualmente, as empresas especializadas em colheita florestal têm sido desafiadas a oferecer seus serviços a um custo aceitável, sem deixar de cumprir a quota de produção dentro do prazo contratado, atender aos padrões de qualidade impostos pela contratante e se adequar às normas trabalhistas e ambientais, etc.

Os impactos ambientais devem ser monitorados pela contratante, proprietária das florestas, certificada pela respectiva norma ISO e por órgãos governamentais específicos do setor florestal.

4. Resultados e Discussão

4.1. Análise dos Custos de Implantação

A avaliação dos custos de geração de energia foi realizada levando em conta a variação de dias e horas de operação.

4.1.1. Memorial de Cálculos

- Cálculos para geração dos dados das tabelas 5.

- Quantidade de energia gerada

Utilizando a equação 15, é possível obter a quantidade de energia gerada ao longo de um ano:

$$Q_{\text{energia}} = 360 \text{ dias} \times 24 \times 16 \text{ kW} \times 0,8$$

$$Q_{\text{energia}} = 110.592,00 \text{ kW/ano}$$

- Custo operacional (CO)

O custo operacional é baseado no custo do combustível utilizado para gerar energia elétrica através do motor de combustão interna e nos custos com a contratação de funcionários. Dessa forma, o valor total em equivalente de energia gerada é:

Custo do combustível (CC) = Custo do diesel (2014) x Consumo específico do motor
(70% gás e 30% diesel).

$$CC = R\$ 2,349 / \text{litro} \times 1,62 \text{ litros} / \text{hora}$$

$$CC = R\$ 3,80 / \text{hora} \rightarrow R\$ 32.832,00 / \text{ano}$$

Esse valor pode ser representado em kW de energia da seguinte forma:

32832 R\$	ano
ano	110592 kW

$$CC = 0,29 \text{ R\$ /kW}$$

Custo operacional (4 operadores total, com pelo menos 1 por turno de 8 horas)(CO):

$$\text{R\$ } 868,8 / \text{ mês} \times 4 = \text{R\$ } 3.475,20 \times 12 = \text{R\$ } 41.702,40 / \text{ ano}$$

Esse valor representado em quantidade de kW é obtido da seguinte forma:

41702,40 R\$	ano
ano	110592 kW

$$CO = 0,37 \text{ R\$ /kW}$$

O custo total de operação (CTO) é calculado somando os custos com combustível para geração de energia elétrica e os custos com trabalhadores para operar os equipamentos. Desta forma, tem-se:

$$CTO = \text{R\$ } 0,29 / \text{kW} + \text{R\$ } 0,37 / \text{kW}$$

$$CTO = \text{R\$ } 0,66 / \text{kW}$$

- Custo de total de manutenção do equipamento (CME)

O custo de manutenção pode ser calculado somando o valor referente à manutenção do equipamento e o valor referente a depreciação do mesmo.

Levando em conta que o valor de manutenção anual do equipamento (CME) representa 5% do valor deste tem-se:

$$\text{R\$ } 219.995,20 / \text{ ano} \times 0,05 = \text{R\$ } 10.999,76 / \text{ ano}$$

Representando esse valor em quantidade de energia tem-se:

10.999,76 R\$	ano
ano	110592 kW

$$CME = R\$ 0,10 / kW$$

O custo de depreciação do equipamento (CD) corresponde a 10% do valor total do equipamento, correspondendo a:

$$CD = R\$ 219.995,20 /ano \times 0,1$$

$$CD = R\$ 21.999,5 / ano$$

Representando esse valor em quantidade de energia, tem-se:

21.999,50 R\$	ano
ano	110592 kW

$$CD = 0,20 R\$ / kW$$

O total dos custos de manutenção representa então o seguinte somatório:

$$CTME = CC + CD$$

$$CTME = R\$ 0,10 / kW + R\$ 0,20 / kW$$

$$CTME = R\$ 0,30 / kW$$

- Custo de geração (CG)

O custo de geração representa o somatório dos custos de manutenção, operação e equipamento. Dessa forma, o custo de geração é:

$$CG = CTO + CTM$$

$$CG = R\$ 0,66 / kW + R\$ 0,28 / kW$$

$$CG = R\$ 0,94 / kW$$

- Custo de Operação e Manutenção (O&M)

Os custos de operação e manutenção podem ser calculados pela equação 14, ou pela soma dos custos totais de operação mais o custo de manutenção, obtendo assim:

$$O\&M = CTO + CTME$$

$$O\&M = R\$ 0,66 / kW + R\$ 0,10 / kW$$

$$O\&M = R\$ 0,76 / kW$$

Os cálculos foram realizados para obter os dados das demais tabelas, seguindo os padrões estabelecidos por cada uma delas.

A Tabela 5 apresenta os dados obtidos com base na operação do equipamento durante 24h por dia, 360 dias. São considerados apenas 360 dias de operação, pois será levado em conta que o equipamento ficará aproximadamente 5 dias inoperante para manutenção. Na Tabela 6, os dados apresentados são referentes à geração de energia durante 24h por dia, 5 dias x 12 meses por ano. A diferença nos dias de operação está baseada na necessidade da cidade em obter uma fonte de energia elétrica durante as festividades locais. Como a média de dias de festas é de aproximadamente 5 dias, este foi considerado para a geração.

Na Tabela 7, estão apresentados os dados referentes à geração de energia durante 8h por dia durante 360 dias. Já a Tabela 8 é referente à geração de energia durante 8h por dia ao longo de 5 dias x 12 meses por ano. Nestas duas últimas tabelas, a geração de apenas 8h é referente ao horário de maior consumo de energia, que é a parte da noite. Essas 8 horas seriam empregadas de 16:00 h às 00:00 h.

Tabela 5. Custos anualizados para a implantação e utilização de um sistema gerador de energia elétrica que atua 24h por dia durante todo o ano.

Custo de implantação	
Valor do equipamento ¹	R\$ 219.995,20
Valor do combustível ²	R\$ 2,349/ litro
Consumo específico do motor ¹	5,4 litros /hora
Potencia liquida gerada ¹	16 kW
Consumo específico do motor (70% gás) ¹	1,62 litros /hora
Fator de capacidade	0,8
Meses de operação	12
Horas de operação	24 horas/dia
Depreciação do gaseificador ¹	5 anos
Dias	30 dias/mês
Salário mínimo ³	R\$ 724,00 mês
Profissional autônomo (20% de encargos)	R\$ 868,80 / mês
Energia Gerada	110.592,00 kW/ano
Custo total operacional (CTO)	
Custo do combustível (CC)	R\$ 3,80 / hora
	R\$ 0,29 / kW
Custo operacional (CO) (1 operadores por turno de 8 horas)	R\$ 3.475,20 / mês
	R\$ 41.702,4 / ano
CTO	R\$0,37 /kW
	R\$ 0,66 / kW
Custo Total de manutenção (CTME)	
5% (valor do equipamento) (CME)	R\$ 10.999,76 / ano
	R\$ 0,10 /kW
Depreciação (CD)	R\$ 21.999,5 / ano
	R\$ 0,20 /kW
CTME	R\$ 0,30 / kW
Custo de geração (CG)	
(CTO) + (CTM)	R\$ 0,96/ kW
Custo de O&M (O&M)	
(CO) + (CME)	R\$ 0,47 /kW

Fonte: ¹ = APOLINÁRIO (2004), ² = PDC (2014), ³ = MTE (2014),

Tabela 6. Custos anualizados para a implantação e utilização de um sistema gerador de energia elétrica que atua 24 h por dia durante 5 dias por mês.

Custo de implantação	
Valor do equipamento ¹ (motor + secador + reator)	R\$ 219.995,20
Valor do combustível ^{2*}	R\$ 2,349/ litro
Consumo específico do motor ¹	5,4 litros /hora
Potencia liquida gerada ¹	16 kW
Consumo específico do motor (70% gás) ¹	1,62 litros /hora
Fator de capacidade	0,8
Meses de operação	12
Horas de operação	24 horas/dia
Depreciação do gaseificador ¹	15 anos
Dias	5 dias/mês
Salário mínimo ³	R\$ 724,00 mês
Profissional autônomo (20% de encargos)	R\$ 868,80 / mês
Energia Gerada	18.492,00 kW/ano
Custo total operacional (CTO)	
Custo do combustível (CC)	R\$ 3,80 / hora R\$ 0,29 / kW
Custo operacional (CO) (1 operador por turno de 24/24 horas)	R\$ 1.737,60/ mês R\$20.851,20 / ano R\$ 1,12 / kW
CTO	R\$1,41 / kW
Custo Total de manutenção (CTM)	
5% (valor do equipamento) (CME)	R\$ 10.999,76 / ano R\$ 0,10 /kW
Depreciação (CD)	R\$ 14.666,34 / ano 0,18R\$/kW
CTME	0,28
Custo de geração (CG) (CTO) + (CTM)	
	R\$ 1,69/kW
Custo de O&M (O&M)	
(CO) + (CME)	
	R\$ 1,22 / kW

Fonte: ¹ = APOLINÁRIO (2004), ² = PDC (2014), ³ = MTE (2014).

Tabela 7. Custos anualizados para a implantação e utilização de um sistema gerador de energia elétrica que atua 8h por dia durante todo o ano.

Custo de implantação	
Valor do equipamento ¹	R\$ 219.995,20
Valor do combustível ²	R\$ 2,349/ litro
Consumo específico do motor ¹	5,4 litros /hora
Potencia liquida gerada ¹	16 kW
Consumo específico do motor (70% gás) ¹	1,62 litros /hora
Fator de capacidade	0,8
Meses de operação	12
Horas de operação	8 horas/dia
Depreciação do gaseificador ¹	10 anos
Dias	30 dias/mês
Salário mínimo ³	R\$ 724,00 mês
Profissional autônomo (20% de encargos)	R\$ 868,80 / mês
Energia Gerada	37.376,00 kW/ano
Custo total operacional (CTO)	
Custo do combustível (CC)	R\$ 3,80 / hora
	R\$ 0,29 / kW
Custo operacional (CO) (1 operadores por turno de 8 horas)	R\$ 1.737,60 / mês
	R\$20.851,20 / ano
CTO	R\$ 0,55 / kW
	R\$ 0,84 / kW
Custo Total de manutenção (CTM)	
5% (valor do equipamento) (CME)	R\$ 10.999,76 / ano
	R\$ 0,29/ kW
Depreciação (CD)	R\$ 21.995,00 / ano
	R\$ 0,58 /kW
CTME	R\$ 0,87 / kW
Custo de geração (CG)	
(CTO) + (CTM)	R\$ 1,71 / kW
Custo de O&M (O&M)	
(CO) + (CME)	R\$ 1,13 /kW

Fonte: ¹ = APOLINÁRIO (2004), ² = PDC (2014), ³ = MTE (2014).

Tabela 8. Custos anualizados para a implantação e utilização de um sistema gerador de energia elétrica que atua 8h por dia durante 5 dias por mês.

Custo de implantação	
Valor do equipamento ¹	R\$ 219.995,20
Valor do combustível ²	R\$ 2,349/ litro
Consumo específico do motor ¹	5,4 litros /hora
Potencia liquida gerada ¹	16 kW
Consumo específico do motor (70% gás) ¹	1,62 litros /hora
Fator de capacidade	0,8
Meses de operação	12
Horas de operação	8 horas/dia
Depreciação do gaseificador ¹	20 anos
Dias	5dias/mês
Salário mínimo ³	R\$ 724,00 mês
Profissional autônomo (20% de encargos)	R\$ 868,80 / mês
Energia Gerada	6.144,00 kW/ano
Custo total operacional (CTO)	
Custo do combustível (CC)	R\$ 3,80 / hora
	R\$ 0,29 / kW
Custo operacional (CO) (1 operadores por turno de 8 horas)	R\$ 868,8 / mês
	R\$ 10.425,60 / ano
CTO	R\$ 1,69/ kW
	R\$ 1,98 /kW
Custo Total de manutenção (CTM)	
5% (valor do equipamento) (CME)	R\$ 10.999,76 / ano
	R\$ 1,79 / ano
Depreciação (CD)	R\$ 10999,76 / ano
	R\$ 1,79/ kW
CTME	R\$ 3,58 / kW
Custo de geração (CG)	
(CTO) + (CTM)	R\$ 5,56/ kW
Custo de O&M (O&M)	
(CO) + (CME)	R\$ 3,77/kW

Fonte: ¹ = APOLINÁRIO (2004), ² = PDC (2014), ³ = MTE (2014).

Ao analisar os dados apresentados pelas quatro tabelas, é indiscutível a diferença de preço apresentada por cada um delas, em questão da geração de energia. A Tabela

5 foi aquela que mais se destacou positivamente, apresentando um custo de energia elétrica gerada de R\$ 0,96 por kW.

Ao contrário dos dados das Tabelas 6, 7 e 8, o número de funcionários presentes na Tabela 5 foi superior à quantidade presente nas demais tabelas, onde, esta variável associada ao valor do combustível, representou uma grande influência no custo total da geração de energia elétrica como representado na Figura 18.

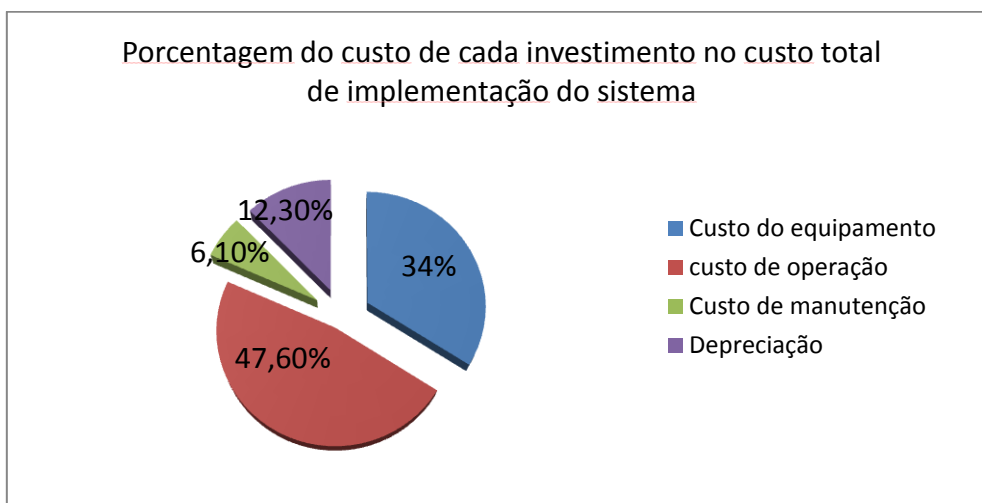


Figura 18. Participação dos custos de acordo com o investimento total.

Quando comparado com a literatura consultada, o valor da energia gerada em R\$ / kW encontrado é superior ao proposto por Apolinário (2004), que foi de R\$ 0,57 / kW, porém deve-se levar em conta o aumento do preço da energia elétrica nos últimos 10 anos, que representou um aumento de aproximadamente 400%. Além disso, o valor do salário mínimo assim como o valor do diesel dobrou.

O menor preço encontrado para a geração de energia elétrica a partir da gaseificação, apesar de ainda ser muito acima do valor pago atualmente, é condizente com o valor referenciado pelo autor no ano de 2004, justificado pela utilização de uma energia limpa quando comparada com o mesmo motor gerando energia elétrica a partir do diesel como combustível. Além do que, a biomassa utilizada é produzida nas próprias comunidades a serem utilizadas e, reduzem o consumo de combustíveis fósseis.

O valor dos custos encontrados é referente apenas a implantação do sistema. Os custos de reflorestamento, colheita e transporte ainda não se encontram inclusos.

4.2. Análise dos Custos de Reflorestamento

Os custos médios em 2012 com o reflorestamento se encontram no Anexo I. Atualizando estes valores para o ano de 2014, o custo médio de reflorestamento representa R\$2.622,49 / ha. Considerando que a propriedade de estudo possui uma área de 21 ha, o custo total de reflorestamento é de R\$ 55.072,29 quando retiradas todas as árvores.

Considerando que o processo de geração de energia elétrica mais rentável foi o de 24h por 365 dias, a vida útil do equipamento é de 5 anos, o que significa que o custo de do reflorestamento anual representa R\$ 11.014,45 e R\$ 0,09 / kW.

Sabendo que o gerador consumirá 0,018 toneladas (ton) de biomassa por hora conforme dados apresentados por Apolinário (2004), ao final de um ano será consumido cerca de 157,68 ton de biomassa ou 1261 árvores de eucalipto por ano.

Uma árvore de eucalipto com idade entre 5 e 6 anos possui peso médio de 125 kg, o que significa que a propriedade total possuem em peso de biomassa 2.625,0 ton. Isso mostra que a madeira produzida pela área escolhida, não só abastece o processo de geração de energia a partir da gaseificação como pode abastecer outros tipos de processos. Dessa forma, o custo de reflorestamento e transporte pode ser diminuído caso retire-se só aquilo que será utilizado no processo ou, realiza-se a colheita, o plantio e o reflorestamento de toda a região e, realize a venda da madeira de eucalipto não utilizada.

Um ponto importante a ser levado em conta é referente ao tempo de estocagem da madeira. Segundo Stein (2003), o tempo máximo de estocagem da madeira no campo é de no máximo 3 a 4 meses pois, passado este tempo, a degradação biológica da madeira aumenta e a secagem desta se torna mais lenta. Desta forma, não seria viável retirar toda a madeira de uma única vez.

Supondo que a venda da madeira não utilizada no processo de geração seja realizada paralelamente ao processo de geração de energia tem-se o preço de venda da madeira de eucalipto dependente da sua finalidade. Os preços médios do ano de 2014 referentes às principais atividades que envolvem a utilização da madeira de eucalipto podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9. Cotações de madeira de eucalipto (R\$/m³).

Atividade	Jan/14	Fev/14	Mar/14	Abr/14	Média
Energia	46,02	47,07	42,48	48,23	46
Tratamento	64,44	66	66,5	66,5	66,75
Serraria	115,8	124,36	129,82	129,82	123,13

Fonte: Adaptado de FLORESTAS CERTIFICADAS, 2014.

Cerca de 14.545,0 árvores de eucalipto não serão utilizadas no processo de geração de energia, desta forma se a madeira vendida for destinada a energia, que é o menor valor representado na tabela 9, estas 19739 representariam um valor de aproximadamente R\$ 181.598,88 valor este que arcaria com o preço de reflorestamento e do transporte no processo de geração de energia elétrica.

Em relação ao espaçamento, para a geração de energia, os espaçamentos podem ser de 3 m x 1,5m (HIGA, 2000). Esse espaçamento inclui em um maior custo de reflorestamento quando comparado com a produção de madeira para a produção de celulose, por exemplo, que exige espaçamentos maiores. Em contra partida, um menor espaçamento influi em uma maior produção de madeira por ha.

4.3. Análise dos Custos de Colheita e Transporte

Segundo SILVA (2012), os custos médios das atividades envolvidas na colheita da madeira de eucalipto correspondem a:

Tabela 10. Custos médios de colheita em R\$ / m³.

Atividade	Custo R\$ /m ³
Corte	5,19
Carregamento	1,75
Tombamento	1,45
Total	8,39

Fonte: Adaptado de SILVA, 2012.

Considerando que o total de madeira a ser colhida é referente a 1.291 árvores de eucalipto a serem utilizadas, esse valor corresponde a aproximadamente 258,2 m³, já que em média uma árvore de eucalipto com a idade de 5 e 6 anos possui um volume médio de 0,20 m³ o que representa cerca de R\$ 2.166,28.

Os custos médios envolvidos na atividade de transporte da madeira de eucalipto correspondem a:

Tabela 11. Custos médios de transporte em R\$ / m³.

Distância de transporte (km)	Custo do transporte (R\$ / m ³)
17	8,57

Fonte: Adaptado de SILVA,2012.

Desta forma, 1291 árvores de eucalipto representariam R\$ 2.212,77.

Tanto o custo da colheita como o custo de transporte representam R\$ 0,02 / kW cada somando R\$ 0,04 / kW ao valor final de geração. Assim, o custo de geração de energia final considerando reflorestamento, colheita e transporte representam para os dados da Tabela 5, **R\$ 1,09 / KW** totais.

5. CONCLUSÃO

A utilização da gaseificação como uma tecnologia para a geração de energia elétrica apesar de ser ainda muito recente e ainda estar em processo de aprimoramento, vem se mostrando eficiente e promissora.

O estudo escolhido para implantação do sistema de geração de energia elétrica no município de São Luis do Paraitinga foi adequado do ponto de vista de aproveitamento energético, apesar do alto valor encontrado para a geração de energia final, mas com muitos pontos a serem melhorados, tendo em vista que o valor do equipamento utilizado quando atualizado para o ano de 2014 mais do que dobrou e conseqüentemente, encareceu muito o valor da energia elétrica, embora a maior participação nesse valor tenha sido com os custos de operação. A potência do equipamento é um fator que se aumentado, geraria uma quantidade maior de energia e assim, diminuiria também o custo final da energia em kW.

A possibilidade da utilização de um combustível renovável em locais que sofrem com a falta de energia elétrica é um fator muito importante tanto para o desenvolvimento do local como para a importância deste na substituição de um combustível renovável.

O custo final da energia produzida se mostrou muito superior quando comparada com a produzida pelas Hidrelétricas, o que pode ser justificado pela utilização recente da gaseificação.

Quando se avalia todo o potencial energético da área escolhida, este além de produzir matéria-prima para a geração de energia, pode gerar um grande lucro com vendas chegando a cobrir os gastos com a tecnologia investida.

6. BIBLIOGRAFIA

APOLINÁRIO, S. M., **1º seminário sobre a utilização de energias renováveis para a eletrificação rural do norte e nordeste do Brasil**. Brasília, 2004.

ABRAF. Associação Brasileira de Florestas Plantadas. Viçosa, Minas Gerais, 2010. Disponível em <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3909>> Acesso em 20 de Ago. 2014.

AMEA. Agencia Municipal de energia de Almada. **Energias não renováveis. Brasil, 2014.** Disponível em <<http://www.ageneal.pt/content01.asp?BTreeID=00/01&treeID=00/01&newsID=7>> Acesso em 16 de Nov. 2014.

BARCELLOS, D. C., COUTO, L. C., MULLER, M. D., COUTO, L., O estado da arte da qualidade da madeira de eucalipto para a produção de energia, um enfoque no tratamento silviculturais. Biomassa & Energia. Viçosa, Minas Gerais, V. 2, n. 2, p. 141-158, 2005.

BARBOSA, L. C. A.; MALTHA, C. R. A.; SILVA. **Determinação da relação siringila/guaiacila da lignina em madeiras de eucalipto por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (PI CG/EM)**. Quím. Nova. 2008, vol.31, n.8, pp. 2035-2041. ISSN 0100-4042.

BARRICHELO, L. E. G. **Características do eucalipto como combustível Análise química e imediata da madeira e da casca**. São Paulo, 1978. p. 63-70.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e papel. **Eucalipto**. Brasília, 2014. Disponível em <<http://bracelpa.org.br/bra2/?q=node/136>> Acesso em 25 de ago. 2014.

CENBIO. Centro Nacional de Referencia em Biomassa. Tecnologias de aproveitamento. São Paulo, 2014. Disponível em <<http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/tecnologias.htm>> Acesso em 02 de Nov. 2014.

COELHO, S. T., MARTINS, O. S. SANTOS, S. M. A., **Estudo da arte da gaseificação**. São Paulo: Centro Nacional de Referencia em Biomassa, 2002.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético anual**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/BEN%202014%20Rel%20S%C3%ADntese%20ab%202013a.pdf>> Acesso em 20 de ago. 2014.

FIGUEIREDO, F. L., **Avaliação de uma unidade autônoma de produção de energia elétrica composta por sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com**

capacidade de 50 KVA. Londrina, 2012. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de edificações e saneamento)

FILHO, J. S., **Estudo da Gaseificação da Torta do Coco Macaúba, Lenha de Eucalipto, Lenha de Café e do Carvão Vegetal e seu Potencial Energético na Desidratação de Frutas.** Itapetinga – BA: UESB, 2009. (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Alimentos – Fenômenos de Transferência na Agroindústria).

FLORESTAS CERTIFICADAS. **Panorama do mercado do eucalipto para o produtor florestal.** Brasil, 2014. Disponível em <[http://www.florestascertificadas.org.br/noticias/panorama-do-eucalipto-para-o-produtor-florestal](http://www.florestascertificadas.org.br/noticias/panorama-do-mercado-do-eucalipto-para-o-produtor-florestal)> Acesso em 06 de Nov. 2014.

FREITAS, K. T., SOUZA, R. C. R., SEYE, O., SANTOS, E. C. S., XAVIER, D. J. C., BACELLAR, A. A., **Custo de geração de energia elétrica em comunidade isolada no Amazonas: Estudo preliminar do projeto NERAM.** Revista Brasileira de Energia, Volume 12 N 1.

GEO BRASIL. O Estado do Meio Ambiente no Brasil. **O estado dos solos.** Disponível em <<http://www.uff.br/cienciaambiental/biblioteca/geobrasil/solos.pdf>> Acesso em 20 de set. 2014.

GOOGLE MAPS. **São Luis do Paraitinga.** Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/place/S%C3%A3o+Lu%C3%ADs+do+Paraitinga+-+SP/@-23.2210152,45.3094244,17z/data=!3m1!4m2!3m1!1s0x94cd17c4d81300b3:0x6b167dc7f18924ea>> Acesso em 02 de Set. 2014.

HIGA, R. C. V., Mora. A. L., Higa, A. R., **Plantio de Eucalipto na Pequena Propriedade Rural.** Curitiba, 2000. Disponível em <<http://www.cnpf.embrapa.br/publica/seriedoc/edicoes/doc54.pdf>> Acesso em 01 de Nov. 2014.

IPEF. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. **I reunião regional sobre clonagem intensiva em Eucalyptus.** São Paulo, 2014. Disponível em <http://www.ipef.br/publicacoes/reuniao_clonagem_intensiva/> Acesso em 21 de Ago. 2014.

LEHNINGER, A. L., Princípios de Bioquímica. 4 Edição, 2006.

LIMA, C. R., **Contribuições da co-geração de energia na qualidade da madeira como material de construção civil.** São Carlos, 1993. 64 p. Dissertação (Mestre em Arquitetura) - EESC - USP.

LOPES, R.P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto do ar.** Universidade Federal De viçosa, 2002, 200p. tese (doutorado em engenharia Agrícola).

LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V., ARADAS, M. E. C. **Geração elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa.** Núcleo em Excelência de Geração em Termoelétrica e Distribuída. Itajubá, 2014.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.** Bioresource Technology, 2002, 83: 37–46.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 2): conversion technologies.** Bioresource Technology, 2002, 83: 47–54.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 3): gasification technologies.** Bioresource Technology, 2002, 83: 55–63.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Biomassa.** Brasília, 2014. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>> Acesso em 20 ago. 2014.

MTE. Ministério do Trabalho e Emprego. **Salário Mínimo.** Brasília, 2014. Disponível em <http://portal.mte.gov.br/sal_min/> Acesso em 03 de Nov. 2014.

MULLER, M. D., Couto, L., Leite, H. G., Brito, J. O., **Avaliação de um clone de eucalipto estabelecido em diferentes densidades de plantio para a produção de biomassa e energia.** Biomassa & Energia, 2005, v. 2, n. 3, p. 177-186.

NAKAY, D. K., **Caracterização de um gaseificador do tipo concorrente utilizando Eucaliptus.** Brasília, 2014. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica).

NNFCC. Review of technology for the gasification of biomass and wastes (Final report). Disponível em <<http://wiki.gekgasifier.com/f/Review+of+Biomass+Gasification+Technologies.NNFCC.Jun09.pdf>>. Acesso em 29 de Ago. 2014.

OLOFSON, I., NORDIN, A., SODERLINDU. **Initial review and evaluation of process Technologies and systems suitable for cost-efficient médium-scale gaseification for biomass to liquid fuel,** 2005.

PDC. Preço dos Combustíveis. **Tabela de preços dos postos de combustíveis em Ubatuba - São Paulo.** São Paulo, 2014. Disponível em <<http://www.precodoscombustiveis.com.br/postos/cidade/3889/sp/ubatuba>> Acesso em 03 de Nov. 2014.

REVISTA DA MADEIRA. **Potencial energético da biomassa eucalipto**. Disponível em <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1727&subject=E%20mais&title=Potencial%20energ%20E9tico%20da%20madeira%20de%20eucalipto> Acesso em 25 de ago. 2014.

RENDEIRO, G., NOGUEIRA, M. F. M., ZÁRATE, H., **Centrais térmicas por gasificação**. In: MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida – Soluções Energéticas para a Amazônia. 1ª Edição. Brasília, 2008. p. 88-105.

RICARDO. **Sítios a venda**. Disponível em <http://fazenda.mercadolivre.com.br/MLB-590380019-sitio-em-so-luis-do-paraitinga-21200-pes-de-eucalipto-_JM> Acesso em 02 de Set. 2014.

SANCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. São Paulo, Editora Átomo, 2010.

SÃO LUIS DO PARAITINGA. **Calendário 2014, Principais Eventos**. São Paulo, 2014. Disponível em <<http://www.saoluizdoparaitinga.sp.gov.br/site/calendario/>> Acesso em 02 de Nov. 2014.

SILVA, A. L. P., **Custo de produção, colheita e transporte de madeira de eucalipto proveniente do programa produtor florestal no sul do Espírito Santo**. Jerônimo Monteiro, 2012. 61p. (Dissertação de mestrado em ciências Florestais).

STEIN, F. R., Universidade Federal de Viçosa, 2003. **Avaliação técnica do tempo de estocagem da madeira**. Orientador: José Lívio Gomide.

SOUZA, M. A., Pires, C. B., **Colheita florestal: mensuração e análise dos custos incorridos na atividade mecanizada de extração**. Custos e Agronegócio - v. 5, n. 2, P.104-132, 2009.

VALADÃO, George Eduardo Sales., ARAUJO, Armando Corrêa. **Introdução ao Tratamento de Minérios I**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VIEIRA, A. C., **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto**. Minas Gerais, 2005. Tese (Pós-graduação em Engenharia Agrícola).

WIKIPÉDIA. **São Luis do Paraitinga**. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%A3o_Luiz_do_Paraitinga> Acesso em 25 de Ago. 2014.

Anexos

Anexo I. Custos médios de atividades do reflorestamento.

Atividade	Custo R\$/ha	Custo R\$/m ³	Custo %
1 – Limpeza de área	335,89	1,52	16,07
2 – Marcação e abertura de covas	212,5	0,97	10,16
3 – Roçada manual área total	205,64	0,93	9,84
4 – Combates à formiga (ano 2 ao ano 6)	171,36	0,78	8,20
5 – Trato cultural na linha	119,96	0,54	5,74
6 – Plantio	115,39	0,52	5,52
7 – Coroamento/trilhamento	114,25	0,52	5,46
8 – Capina pré-plantio	109,68	0,49	5,25
9 – Adubação de 1 ano (Calcário + NPK)	108,54	0,49	5,19
10 – Trato cultural na entrelinha	98,26	0,45	4,70
11 – Adubação 90 dias	85,69	0,39	4,10
12 – Adubação de 10 dias	71,97	0,33	3,44
13 – Recoroamento/Trilhamento	68,55	0,31	3,28
14 – Trato cultural área total	68,55	0,31	3,28
15 – Replantio	45,7	0,2	2,19
16 – Combate inicial à formiga	28,56	0,13	1,37
17 – Primeiro repasse à formiga	17,13	0,08	0,82
18 – Segundo repasse à formiga	14,85	0,07	0,71
Total	2.090,73	9,48	100,00

Fonte: Adaptado de SILVA,2012.