



Universidade Estadual de Maringá

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA**

**Avaliação dos Impactos Econômicos e Ambientais para a Utilização de
Biomassa para Geração de Energia Elétrica**

ETIENE NATANIEL PEDRO DUNDÃO

**Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Bioenergia da
Universidade Estadual de Maringá,
área de concentração, Biocombustível.**

Maringá, 27 de fevereiro de 2019



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

D914a

Dundão, Etiene Nataniel Pedro
Avaliação dos impactos econômicos e ambientais para a
utilização de biomassa para geração de energia elétrica /
Etiene Nataniel Pedro Dundão. - Maringá, 2019.
60 f. : il., figs., tabs.

Orientador (a): Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá
Ravagnani.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia
Química, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, 2019.

1. Cana-de-açúcar - Biomassa. 2. Cana-de-açúcar -
energia. 3. Cogeração. 3. Avaliação. 4. Viabilidade e
geração. I. Ravagnani, Mauro Antônio da Silva Sá, orient.
II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-
Graduação em Bioenergia. III. Título.

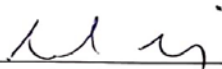
CDD 21.ed.660.634

MAR-2019/094

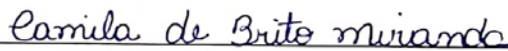
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

Esta é a versão final da dissertação de Mestrado apresentada por **Etiene Nataniel Pedro Dundão** perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Bioenergia em 27 de fevereiro de 2019.

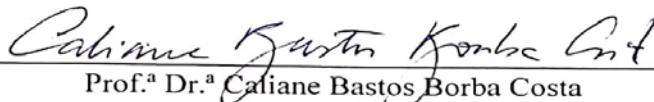
COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani
Orientador/Presidente



Prof.^a Dr.^a Camila de Brito Miranda Faia
Coorientadora



Prof.^a Dr.^a Caliane Bastos Borba Costa
Membro



Prof. Dr. Leandro Vítor Pavão
Membro



Universidade Estadual de Maringá

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA



"É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer".
Aristóteles



Universidade Estadual de Maringá

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA



A minha nobre mãe, **Mariana Pedro** (*in memoriam*), a qual ensinou-me a discernir o certo e/ou correto e as duas grandes mulheres da minha vida, Leila Dundão e Madalena Dundão.

DEDICO.



AGRADECIMENTOS

A minha família, meu pai, meus irmãos/família Pedro Dundão, meus alicerces, pelo amor infinito, força, incentivo imensurável e atenção dada até hoje, aconselhando-me nas decisões e me apoiando para que eu não desista em momento algum. Pela companhia diária e pela confiança na minha capacidade de lutar para conquistar meus objetivos, como a conquista desse trabalho, meu eterno amor e gratidão.

Ao meu primo, Vuaituma Sebastião, por me incentivar a gostar de matemática.

Ao meu bom Tutor e Mantenedor, Embaixador Ismael Diogo da Silva, pelos conselhos infinitos e ter me incentivado a crescer infinitamente.

Ao Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani por ter aceitado dividir este desafio, por toda orientação, confiança e conhecimento disseminados, orientando-me de maneira clara e objetiva em busca de mais uma conquista em minha vida.

As verdadeiras amigas construídas nos 10 anos de vivencia no Brasil, pelo companheirismo, amizade, incentivo e o carinho de todos também foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Bioenergia, em especial as estimadas **Maria Sueli e a Dra. Camila Miranda** pela confiança no trabalho em busca de alternativas fundamentadas para a melhorar a cada dia.

A comissão dos Angolanos em Maringá, especialmente todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

E por último, e não menos importante, **o IDS-Estudante Projeto de Formação de Quadros Angolano**, o qual faz parte imensuravelmente de toda essa trajetória, na qual durou 10 anos de vivencia no Brasil.

O meu muitíssimo obrigado!



Avaliação dos Impactos Econômicos e Ambientais para a Utilização de Biomassa para Geração de Energia Elétrica

RESUMO

A produção de energia elétrica é uma celeridade de grande estima no plano do desenvolvimento de qualquer capitalização. O Brasil possui, em relação a outras nações, a vantagem de poder planejar sua matriz energética aproveitando grandes quantidades de fontes primárias renováveis. Entre elas a biomassa gerada pela cana-de-açúcar e biomassa gerada pela lenha, as quais poderão fortalecer nos próximos anos a matriz energética. Apesar de disponível há algum tempo, observa-se que estas fontes têm sido subutilizadas para geração comercial de energia elétrica. A reformulação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), instituído pelo Governo Federal em 2002, e o seu surgimento do mercado de créditos de carbono, impulsionado pelo Protocolo de Kyoto, reverteram este quadro, fazendo com que a biomassa de cana-de-açúcar fosse utilizada de forma mais intensa, tornando-se um componente importante na matriz energética brasileira. Este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos econômicos e ambientais a partir da biomassa para geração de energia elétrica, dando atenção ao comparativo técnico e científico no uso do bagaço de cana-de-açúcar com relação a lenha para geração de energia elétrica. Os resultados analisados indicam que a geração de energia elétrica tornar-se-á um produto técnico e economicamente viável, recomendando que os custos da energia produzida tendem a cair com a curva de aprendizado e o aumento natural de escala de produção.

Palavras-chave: biomassa, cogeração, avaliação, viabilidade e geração de energia elétrica.



Avaliação dos Impactos Econômicos e Ambientais para a Utilização de Biomassa para Geração de Energia Elétrica

ABSTRACT

The production of electrical energy is a celerity of a big estimation of schedule on the development of any capitalization. Brazil has, comparing to other nations, an advantage to be able to schedule it's energetic matrices taking advantage of big quantities of primary renewable resources. One of them is the biomass generated by the sugarcane and firewood, which will strengthen in the next years the energetic matrices. Although available time, we've noticed the resource has been underutilized for the commercialisation of electrical energy. The reformulation of the Incentive Program of Alternative Resources of Energy (PROINFA), instituted by the Federal Governor in 2002, and the emergence of the carbon credits market, boosted by Kyoto Protocol, reverted this frame, by making the sugarcane biomass used more intensely, making it an important component on Brazil's energetic matrice. Such work will evaluate the economic and environmental impacts from biomass to generated electrical energy, giving enough attention on the point of view of energy consummation, the cost of the construction installation, environmental impacts and the process sustainability. The analysed results indicated that generation of electrical energy will become a technical and economically viable product, recommending the costs of produced energy tend to decrease with the learning and the increase of natural product scale.

Keywords: biomass, cogeneration, evaluation, feasibility and generation of electric energy.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotas de conversão energética da biomassa.....	14
Figura 2 – Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar.....	18
Figura 3 – Matriz Energética Brasileira.....	21
Figura 4 – Evolução e projeção da oferta de energia interna.....	22
Figura 5 – Caldeira aquotubular de cogeração.....	23
Figura 6 – Sistema de cogeração da usina termelétrica utilizando biomassa.....	25
Figura 7 – Esquematisação do sistema convencional de produção de Energia Elétrica.....	26
Figura 8 – Esquematisação do sistema de cogeração.....	26
Figura 9 – Representação gráfica do processo de produção do vapor.....	31

LISTA DE TABELAS



Tabela 1 - Quantificação dos hectares plantado de cana-de-açúcar.....	13
Tabela 2 - Variação do poder calorífico conforme o tempo de estocagem e o teor de umidade da lenha.....	30
Tabela 3 - Comparativo entre o poder calorífico de várias fontes de energia.....	30
Tabela 4 - Informações técnicas da caldeira.....	34
Tabela 5 - Quantidade mensal dos combustíveis consumidos e despesa em R\$	35
Tabela 6 - PCI e densidade do bagaço de cana-de-açúcar, lenha e cavaco.....	37
Tabela 7 - Valores obtidos durante a inserção da mistura da lenha e o bagaço de cana-de-açúcar na caldeira.....	38
Tabela 8 - Gravidade, frequência e probabilidade de ocorrência dos impactos.....	40
Tabela 9 - Grau de significância dos impactos.....	41
Tabela 10 - Comparativo do uso de 100% bagaço de cana-de-açúcar ou 100% lenha como combustível.....	42
Tabela 11 - Economia do uso de 100% de bagaço de cana-de-açúcar ou 100% de lenha como combustível.....	44
Tabela 12 - Resultados da classificação dos impactos ambientais identificados na seção de recebimento do combustível da usina de cogeração.....	45
Tabela 13 - Resultados da classificação dos impactos ambientais identificados no setor da caldeira da usina de cogeração.....	48



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

GEE - Emissões de Gases com Efeito de Estufa

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores

NBR - Norma Brasileira

PIB - Produto Interno Bruto

PNE - Plano Nacional de Energia

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia

SBS - Sociedade Brasileira de Silvicultura

SEMA - Secretaria Municipal do Meio Ambiente

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

LAIA - Levantamento de Aspectos e Impactos Ambientais

CO₂ - Dióxido de Carbono

CH₄ - Gás Metano

h_a - Entalpia da Água em Função da Temperatura (kcal/kg)



SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	17
RESUMO	18
ABSTRACT	19
LISTA DE FIGURAS	20
LISTA DE TABELAS	20
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	22
SUMÁRIO	23
1 INTRODUÇÃO	12
2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 – Cana-de-açúcar no Brasil	17
2.2 – Biomassa Residual da Eucaliptocultura	19
2.3 – Energia da Biomassa	19
2.4 – Matriz Energética Brasileira.....	20
2.5 – Cogeração nas Usinas.....	23
2.6 – Análises físico-químicas da biomassa	27
2.6.1 – Teor de umidade.....	27
2.6.2 – Poder calorífico	28
2.6.3 – Processo de produção do vapor	30
3 – METODOLOGIA	32
3.1 – Matérias e Métodos	32
3.1.1 – Geração de vapor.....	33
3.1.1.1 – Característica do sistema de geração de vapor.....	33
3.1.2 – Referência do consumo mensal da caldeira	34
3.1.3 – Poder Calorífico Inferior (PCI) e umidade dos combustíveis	36
3.1.3.1 – Cálculo do Poder Calorífico dos combustíveis com umidade até 45 %.....	36
3.1.4 – Cálculo do Poder Calorífico Inferior da lenha	37
3.2 – Avaliação econômico-financeira.....	37
3.3 – Avaliação dos Impactos Ambientais	38
4 – RESULTADOS	42
4.1 – Análises físico-químicas da biomassa.....	42
4.2 – Análise econômico-financeira	42
4.3 – Análise dos impactos ambientais	45
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50
6 – REFÊRENCIAS	52



1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista que a sustentabilidade nos permite usufruir das coisas do dia a dia sem esquecer as gerações vindouras, por este modo, iniciativas governamentais têm criado incentivos à produção de matérias-primas para suprir a demanda por biodiesel. Todavia, as tecnologias carecem de estudos que possam favorecer a propagação com o desenvolvimento de métodos e protocolos de propagação mais eficientes. Procura-se esmiuçar também que, a bioenergia é a energia obtida através da biomassa. A biomassa armazena a energia obtida do sol através do processo da fotossíntese. Um dos benefícios da biomassa é que a energia nela contida pode ficar armazenada por muitos anos, infinitamente. A biomassa é uma fonte de energia renovável, desde que as plantas sejam constantemente cultivadas e pode ser convertida em combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos, por meio de tecnologias conhecidas, gerando calor para aquecimento, eletricidade ou combustíveis. As biomassas sempre foram utilizadas pelo homem como fonte de energia, porém, nem sempre de maneira sustentável, como o exemplo do desmatamento para produção de carvão. Atualmente, o interesse no uso das biomassas como fonte de energia se deve ao fato da necessidade de redução da “pegada de carbono”, ou a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, no que todos os países deveriam estar interessados.

Segundo a matriz energética brasileira, dentre as fontes renováveis a biomassa será detentora de grande potencial de eletricidade explorado no país. A produção de energia elétrica a partir da biomassa da cana-de-açúcar e/ou lenha é tema presente nos estudos sobre energia no Brasil, na qual corresponde a uma parcela considerada da energia comercializada. Analisou-se que o setor sucroalcooleiro vem tendo notoriedade no mercado nacional e internacional por conta da diversidade e progresso da sua produtividade.

De acordo com ÚNICA (2018), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com 10.132.748 de hectares plantados na safra de 2018 e apresentado na Tabela 1, o que significa uma produção de aproximadamente 200 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar.



Tabela 1: quantificação dos hectares plantado de cana-de-açúcar.

ESTADO	HECTARES
Acre	0
Alagoas	399.170
Amapá	0
Amazonas	4.397
Bahia	120.670
Ceará	21.281
Distrito Federal	0
Espírito Santo	77.915
Goiás	967.936
Maranhão	47.276
Mato Grosso	300.177
Mato Grosso do Sul	692.300
Minas Gerais	1.071.934
Pará	16.628
Paraíba	149.209
Paraná	678.290
Pernambuco	320.942
Piauí	18.140
Rio de Janeiro	82.519
Rio Grande do Norte	56.288
Rio Grande do Sul	22.321
Rondônia	0
Roraima	0
São Paulo	5.728.285
Santa Catarina	0
Sergipe	58.820
Tocantins	35.411
Região Centro-Sul	9.621.677
Região Norte-Nordeste	1.248.232
Brasil	10.132.748

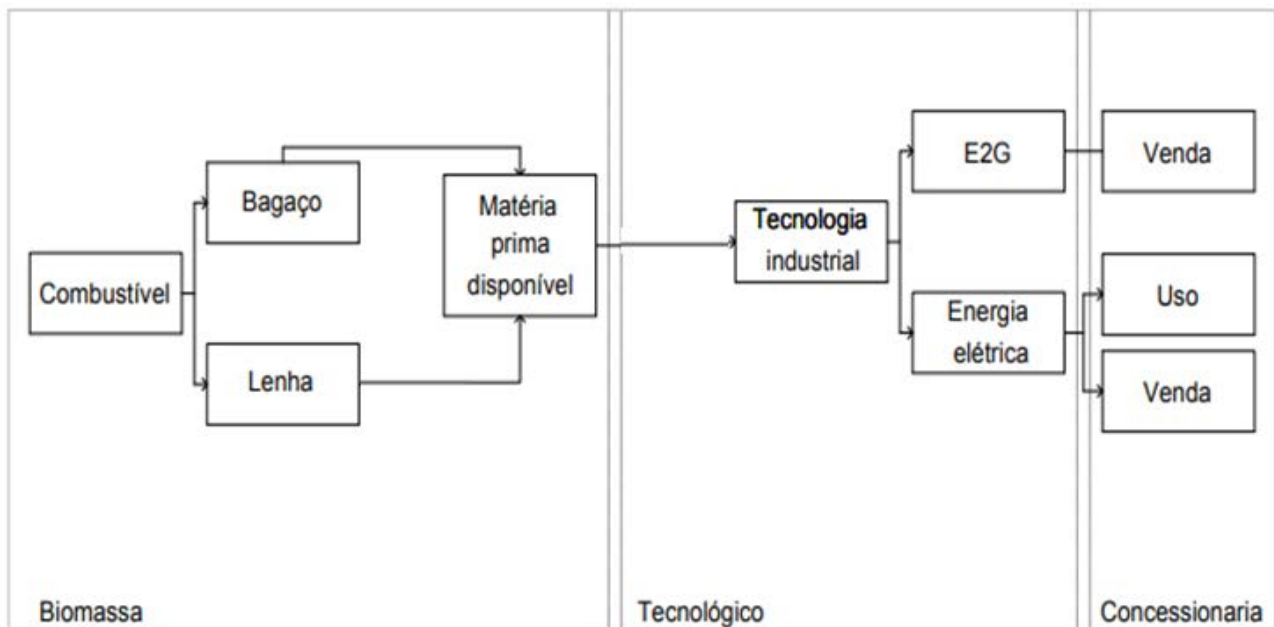
Fonte: Adaptado de CONAB; UNICA (2018).



Ainda de acordo com a UNICA (2017), com referência somente à bioeletricidade da cana-de-açúcar, o setor sucroenergético detém em torno de 77% da potência concedida no Brasil em relação às fontes biomassa, sendo a terceira fonte de cogeração mais importante da matriz elétrica em termos de capacidade instalada, atrás apenas da fonte hídrica e das termelétricas com gás natural.

Depois do século XXI a biomassa agroflorestal passou a ter um aproveitamento energético mais eficaz. Atualmente são utilizadas na caldeira, aumentando a geração elétrica, e, conseqüentemente, o faturamento, além de garantir o cumprimento da energia contratada. A energia obtida através da biomassa no processo, requer a queima da lenha e bagaço de cana-de-açúcar para a produção de calor, que é empregado na geração de vapor, que é utilizado para gerar energia. A Figura 1 apresenta as rotas de conversão energética da biomassa.

Figura 1: Rotas de conversão energética da biomassa.



Fonte: Adaptado de Trombeta *et al.* (2015).

Atualmente as usinas geradoras de eletricidade que utilizam a biomassa, procuram sempre aumentar a produtividade e melhorar a qualidade de seus produtos visando à demanda do mercado. Sobretudo, procuram prevenir e fazer com que os seus produtos tenham um ritmo acelerado, levando aos seus limites de trabalho. Para que isso aconteça



temporariamente ou permanentemente, apostam na confiabilidade e disponibilidade dos seus ativos em tempo integral, sendo necessário manter o devido controle. No entanto, pressupõe-se que a biomassa e outras culturas sustentáveis ou o uso da biomassa como alternativa energética, depende de maior controle e levantamento dos aspectos e impactos ambientais. Baseando-se nesses fatores, pode-se usufruir muito com a energia renovável. Cabe também ressaltarmos que toda bioenergia é uma energia renovável, porém nem toda energia renovável é uma bioenergia.

Entende-se por energia renovável aquela obtida a partir de fontes naturais e que, por sua vez, são capazes de se regenerar. Pode-se ilustrar este conceito com os seguintes exemplos de energias renováveis: energia hidráulica, solar, eólica, geotérmica e maremotriz. Se faz necessário a busca de alternativas energéticas sustentáveis visando atender a demanda crescente de energia no âmbito mundial. Muitas alternativas surgiram como solução deste problema, dando-se destaque a energia solar, a energia eólica, a energia atômica e a energia proveniente das biomassas. Todas as alternativas citadas possuem vantagens e desvantagens que devem ser levadas em consideração. Por este motivo, até o momento, nenhuma das opções despontou como a melhor alternativa, mas cada uma deve ser analisada, verificando-se a melhor relação custo-benefício para cada aplicação.

O objetivo geral deste trabalho é fazer um comparativo técnico e científico do uso da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar com relação a lenha para a geração de energia elétrica.

Como objetivos específicos deste trabalho almejou-se realizar análise do balanço energético no processo da geração de energia elétrica utilizando a lenha e o bagaço de cana-de-açúcar; melhorar a eficiência energética e avaliar os impactos econômicos e ambientais.

Este estudo pretende fornecer as informações necessárias para que as usinas de cogeração comprovem a viabilidade da adequação da lenha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar, a fim de agregar valor à mesma, promovendo, assim, uma diminuição considerável nos impactos econômicos e ambientais.

A fim de atingir os objetivos propostos, inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica, abordando as principais biomassas envolvidas nessa pesquisa (lenha e bagaço de cana-de-açúcar), a matriz energética brasileira, o processo de cogeração nas usinas e as análises físico-químicas das biomassas. Posteriormente, apresentou-se a



metodologia desta pesquisa, que se caracteriza como quantitativa com método descritivo, com a utilização de levantamento documental e pesquisa de campo. Na elaboração da pesquisa buscou-se conhecer as características da indústria utilizada como fonte de levantamento de dados. Posteriormente, foi apresentada a influência do poder calorífico envolvido. Foram apresentados os resultados da análise econômica com relação as biomassas envolvidas. E por fim, apresentaram-se as conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.



2 – REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa foi desenvolvida uma revisão da literatura, mostrando os principais trabalhos encontrados a respeito do tema dessa dissertação, na qual, abordar-se-á tecnologias utilizando bagaço de cana-de-açúcar e lenha para cogeração de energia elétrica e a avaliação dos impactos econômicos e ambientais.

O uso da biomassa para geração de energia elétrica se popularizou, devido aos baixos riscos ambientais e à menor poluição, sendo uma alternativa favorável em relação ao uso de combustíveis fósseis e seus derivados (XU et al., 2013). As biomassas estão melhor distribuídas geograficamente, em comparação às fontes fósseis. Sasmal et al. (2012), avaliaram que a produção de biomassa residual mundial seja de 220 bilhões de toneladas por ano.

As biomassas aumentam a possibilidade de diversificação e descentralização do abastecimento de energia e podem favorecer a autonomia energética no âmbito local, regional e nacional. Neste contexto, as biomassas representam uma fonte renovável, barata e ainda, na maior parte dos casos, inexplorada de matéria-prima para a conversão em combustíveis sólidos, líquidos, gasosos e outras formas relevantes para a indústria (DHILLON; WUEHLISCH, 2013).

2.1 – Cana-de-açúcar no Brasil

No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada desde a chegada dos portugueses, no século XVI. Atualmente ocupa, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), 10.132,7 de hectares do território brasileiro. Há 411 unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia, sendo 292 mistas, 95 que produzem somente álcool e 10 exclusivamente açucareiras (UNICA, 2017). A produção de cana-de-açúcar se concentra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil. De acordo com as safras das regiões brasileiras das últimas décadas, os estados de São Paulo e do Paraná são os responsáveis por metade da colheita nacional. A Figura 2 ilustra o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar, cujos territórios são classificados quanto ao potencial das terras para a produção da cultura da cana-de-açúcar em regime de sequeiro (sem irrigação plena), tendo como base as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos expressos espacialmente em levantamentos de solos e em

estudos sobre risco climático, relacionados com os requerimentos da cultura (precipitação, temperatura, ocorrência de geadas e veranicos).

Figura 2: Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar



Fonte: EMBRAPA (2013).

Deste modo, é plausível fornecer elementos técnicos para formulação de políticas públicas visando à expansão e produção sustentável de cana-de-açúcar no território brasileiro (EMBRAPA, 2013).

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene e possui ciclo médio de 4 anos, desde a plantação até a renovação das áreas plantadas. Ela faz parte da família Poacea do gênero Saccharum. É frequentemente cultivada nas regiões tropicais e subtropicais, pois necessita de uma época quente e chuvosa para o desenvolvimento vegetativo e uma época fria e/ou seca para o enriquecimento em açúcares.



2.2 – Biomassa Residual da Eucaliptocultura

A biomassa silvícola tem grande relevância na balança comercial brasileira, gerando uma quantidade considerável de resíduos. Ressalte-se que, apesar de ser o quarto produto na balança comercial do agronegócio brasileiro, com PIB de 60,6 bilhões de reais, as plantações florestais comerciais ocupam aproximadamente 7,7 milhões de hectares, sendo 74.8% correspondente ao cultivo do Eucalipto (IBÁ, 2015).

Segundo pesquisas da Sociedade Brasileira de Silvicultura – SBS (2015), durante a operação de colheita florestal, partes da árvore que possuem diâmetro menor que quatro centímetros, bem como galhos, ramo, folhas, ponteiros e partes quebradas, são deixados no local considerados como biomassa residual. Na eucaliptocultura, uma árvore em média, produz 29% de cascas, galho e folhas, portanto 71% da biomassa são transportados para a indústria, onde passam por um processo de descascamento e picagem, para a transformação em cavacos, que por sua vez são classificados para o aproveitamento no processo das caldeiras. Logo, um desafio da ciência é o bom emprego destes combustíveis, no estado sólido, de modo que possa trazer benefícios energéticos e uma política socioeconômica, focada na sustentabilidade e com grande impacto socioambiental.

2.3 – Energia da Biomassa

A biomassa é um dos recursos energéticos mais antigos da humanidade, e a energia gerada, a mais abundante e versátil entre as renováveis no planeta (DIPTI; PRIYANKA, 2013). Uma boa parte da população mundial depende de lenha, resíduos agroflorestais, esterco animal e de outros tipos de resíduos para satisfazerem as suas necessidades energéticas em domicílios.

As biomassas são oriundas em larga escala de atividades agrícolas, pesca, resíduos da indústria da madeira, instalações agropecuárias, efluentes e resíduos de indústrias agroalimentares. De uma forma mais simplificada, pode-se conceituar que é o material biológico susceptível de aproveitamento energético (GERMEK et al., 2014).

As biomassas se diferenciam de acordo com suas origens ou características físicas e químicas. Considera-se biomassa primária aquela obtida de produtos oriundos diretamente de culturas, como a cana-de-açúcar para produção do etanol e de culturas oleaginosas para a produção de biodiesel. Já a biomassa secundária, é um produto



resultante de processos de conversão dos combustíveis energéticos primários. Pode ter origens diversas, sendo dividida em três tipos de matérias primas: vegetais não lenhosos, vegetais lenhosos e resíduos orgânicos (BEN-IWO et al., 2016).

A biomassa é um recurso que pode atingir emissões de carbono baixas ou quase nulas (desde que a matéria-prima utilizada seja gerida de forma sustentável). A sua combustão é menos poluente, porque apesar da liberação de CO₂ para a atmosfera, dando origem à matéria-prima, tornando assim, um balanço de emissões de CO₂ nulo (HÖLDER, 2016).

Na agronomia, em especial, a biomassa residual é um subproduto que desempenha regularmente outras funções, como a manutenção da qualidade do solo ou o fornecimento de habitats. Os benefícios de extração da biomassa residual para novas aplicações, causando uma mudança de uso de recursos, devem superar a perda de valores de sua função anterior (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2015).

Pesquisas têm mostrado que o destino da biomassa agroflorestal residual para o uso de eletricidade é uma atividade ambientalmente segura, e que uma excisão parcial do volume produzido tem pouca implicação ou, talvez, nenhuma, sobre as perdas inerentes ao solo por erosão (RAGHU et al., 2011; SULLIVAN et al., 2011) e de material orgânico (TRIVEDI et al, 2015).

Num país de clima tropical e com um vasto território como o Brasil, a bioenergia é uma alternativa de energia sustentável de suma importância, tanto para o presente, como para o futuro. No entanto, exercerá um papel decisivo nos sistemas integrados de provisão energético futuro e constituirá um ambiente precioso de um novo *mix* energético.

2.4 – Matriz Energética Brasileira

A Matriz Energética é composta por toda a energia disponibilizada para ser transformada, distribuída e consumida nos processos produtivos. Representa a quantidade da oferta de energia, ou seja, a quantidade de recursos energéticos oferecidos por um país ou por uma região (BEN, 2016).

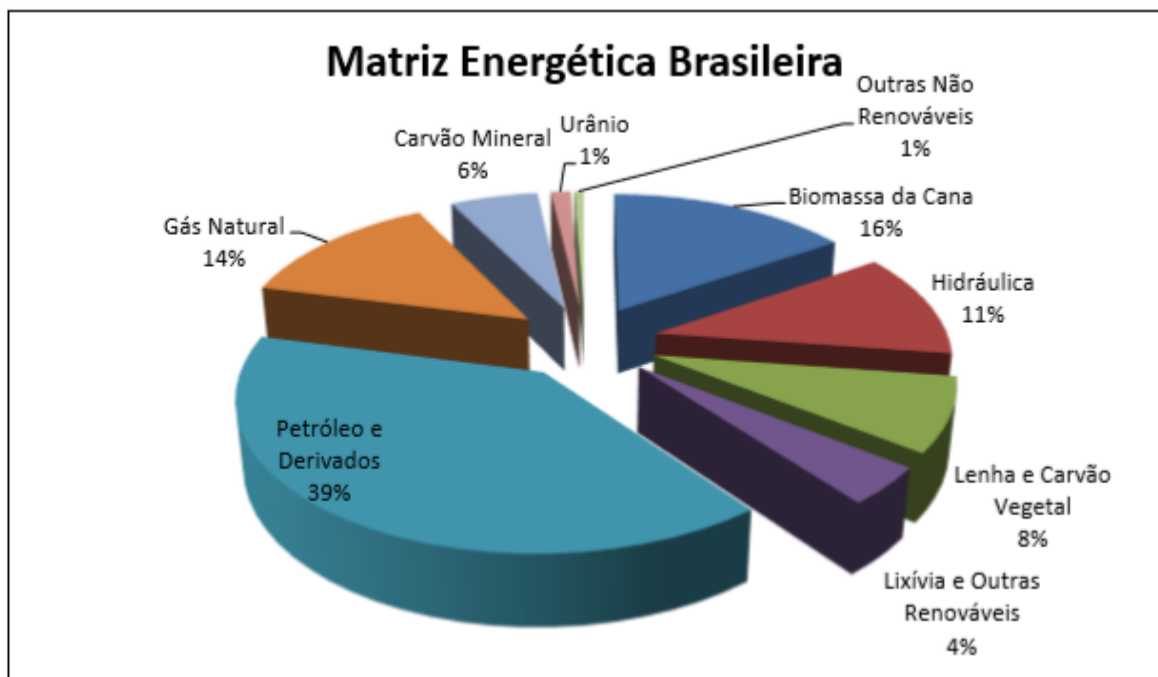
A biomassa é considerada uma fonte energética limpa e renovável e seu interesse ganhou espaço no mercado de energia, passando a ser considerada uma boa alternativa para a diversificação da matriz energética e consequente redução da dependência dos



combustíveis fósseis. Por estes motivos e incentivos do setor público e do setor privado na produção de energia utilizando a biomassa poderá aumentar consideravelmente nos próximos anos.

A Figura 3, apresenta alguns dados da matriz energética brasileira, sendo eles distribuídos em: Urânio 1%, Outras não Renováveis 1%, Lixívia e Outras Renováveis 4%, Carvão Mineral 6%, Lenha e Carvão Vegetal 8%, Hidráulica 11%, Gás Natural 14%, Biomassa da Cana 16%, Petróleo e Derivados 39%. O Petróleo e dos seus derivados ainda são os mais utilizados.

Figura 3: Matriz Energética Brasileira



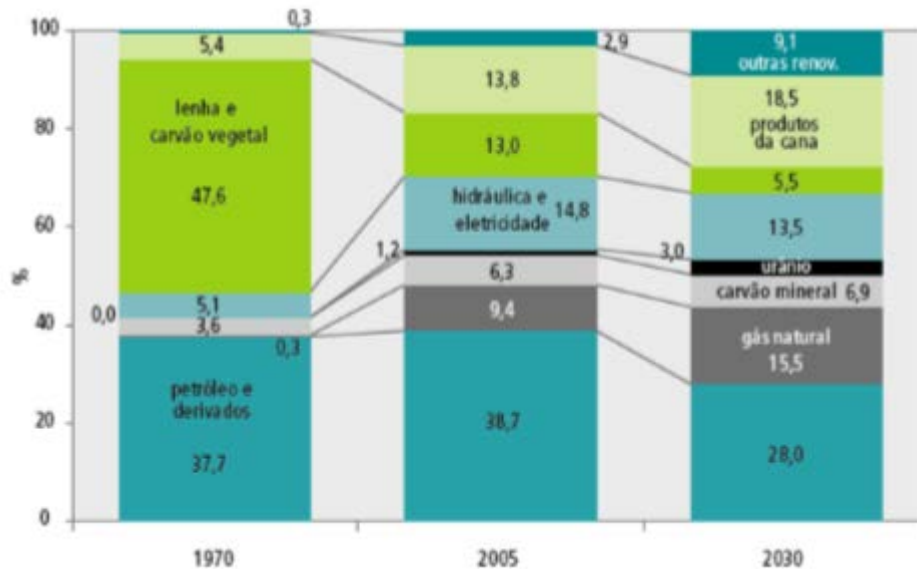
Fonte: BEN (2017).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a matriz elétrica brasileira indica que a biomassa residual responde atualmente por 8,83 % do total nacional, merecem destaque o bagaço da cana-de-açúcar (78,2 %), os resíduos do setor florestal (20 %) e outras fontes (11,8 %) como a casca de arroz e o capim-elefante (ANEEL, 2016). O Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 prevê algumas modificações na estruturação da matriz energética brasileira. Há projeção de redução de aproximadamente



10 % na dependência de combustíveis fósseis e, um conseqüente aumento na utilização de formas de energias renováveis.

Figura 4: Evolução e projeção da oferta de energia interna.



Fonte: Plano Nacional de Energia (2030).

Portanto, o uso de novas fontes renováveis, a racionalização dos consumos e o aumento de sua eficiência, surgem então, como objetivos a serem atingidos a curto e em médio prazo (DE BESI; MCCORMICK, 2015).

Um dos motivos para a biomassa ter reaparecido nos últimos anos como alternativa energética foi a melhoria nas tecnologias concernentes aos métodos de conversão, proporcionando atualmente baixo custo e uma melhor eficiência, diferentemente de processos anteriores. O segundo elemento é a alta produtividade encontrada no ramo agroflorestal e, por conseqüente, o de suas biomassas residuais. Este cenário levou a uma política de redução dos excedentes, reduzindo os passivos ambientais causados por este tipo de resíduo. O terceiro elemento trata das alterações climáticas devido às emissões de gases com efeito de estufa (GEE) (CO₂, CH₄, entre outros), o qual se tornou um fomento às fontes de energias renováveis em geral (UCZAI et al., 2012).

Deste modo, salienta-se que segurança e eficiência energéticas são dois valores que devem acompanhar os projetos de expansão agroindustrial. Isto significa mobilizar recursos energéticos disponíveis para o auto abastecimento, ganhando terreno no



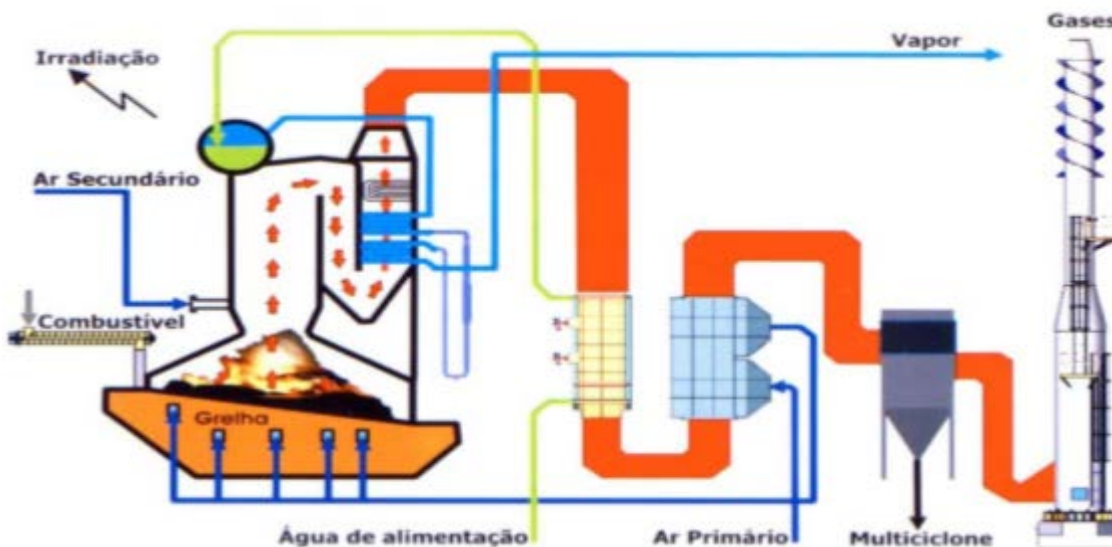
mercado e conceituando que a geração distribuída de energia elétrica, a cogeração de energia térmica e a produção descentralizada de combustíveis devem ocorrer de forma simultânea.

2.5 – Cogeração nas Usinas

As caldeiras ou geradores de vapor são os nomes dados aos equipamentos que tem como função mudar o estado da água, de líquido para o vapor. Outros fluidos podem ser utilizados para produção de vapor, todavia, a água é preferida, pois possui elevado calor latente de mudança de fase. Os geradores de vapor são comumente utilizados em processos industriais e na geração de energia elétrica (INNOCENTE,2011).

A Figura 5, apresenta o esquema de uma caldeira aquotubular. Neste tipo de caldeira a água a ser vaporizada circula pelos tubos e pela fornalha, e os produtos de combustão pelo exterior dos tubos. A caldeira aquotubular é mais utilizada em modernos projetos industriais, como as modernas termelétricas, tendo em vista que esse tipo de caldeira tem a capacidade de produzir grandes quantidades de vapor, sempre a elevadas temperaturas e pressão de trabalho.

Figura 5: Caldeira aquotubular de cogeração.



Fonte: SCHURHUAS (2008).



Segundo COGEN (2018), cogeração o método de transformação de energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil. A forma mais frequente é a energia mecânica, que é utilizada diretamente no acionamento de equipamentos ou para geração de energia elétrica e a energia térmica que é utilizada diretamente no atendimento das necessidades de calor para processos.

Segundo HAMMERTON et al. (2018), a palavra “cogeração” advém dos Estados Unidos da América e é normalmente empregada para designar os métodos de produção combinada de energia térmica e potência, mecânica ou elétrica, com o uso da energia liberada por uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico. Um dos aspectos mais importante é o que o sistema de cogeração é projetado para satisfazer a demanda térmica do consumidor, já que não é viável, na maioria dos casos, comprar este tipo de energia de outra empresa. A potência elétrica produzida pode atender a totalidade das necessidades da própria planta industrial, existindo também a possibilidade de produção excedente de energia elétrica para a venda, constituindo-se em mais um produto econômico da empresa.

Segundo Gabriel Filho et al. (2007), existe distinção entre os sistemas de cogeração de acordo com as necessidades em energia elétrica e térmica, os custos de instalação e operação e os níveis de emissões e ruídos.

Para classificar os sistemas de cogeração, pode-se dizer que são separados necessariamente em dois grupos, que se distinguem em função da sequência de utilização da energia, podendo ser o ciclo “*bottoming*” ou ciclo “*topping*”

As principais diferenças entre eles são:

- **Bottoming** – geralmente é utilizado restritamente, uma vez que o calor rejeitado pelos processos industriais se encontra em níveis de temperatura geralmente insuficientes para o seu emprego na produção de energia eletromecânica. Alguns processos industriais opera em altas temperaturas, entre 100 ~ 1200°C. Após o processo, os gases de exaustão ainda encontram-se a temperaturas elevadas (500 ~600°C);
- **Topping** – através da energia disponibilizada pelo combustível o primeiro aproveitamento se dá para a geração de energia eletromecânica (altas temperaturas), em seguida para o aproveitamento de calor útil, sendo o rejeito da

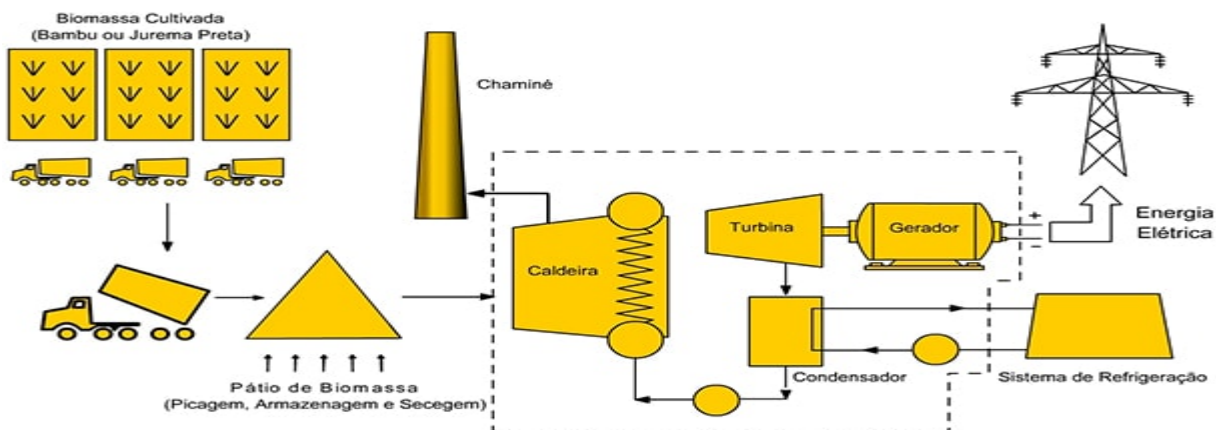


geração elétrica no qual este calor poderá ser usado como uma fonte de energia para secadores situados dentro das empresas, principalmente das cerâmicas.

O método clássico de cogeração brasileiro é do ciclo *topping* (superior) a vapor, em contrapressão. Neste processo, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor, alimentando as turbinas de acionamento mecânico do processo e as turbinas para geração de energia elétrica. Ao sair das turbinas após a realização do trabalho, o vapor é encaminhado para atender as necessidades térmicas do processo produtivo.

A Figura 6, ilustra um sistema de cogeração da usina termelétrica, movido a biomassa agroflorestal. A cogeração implementada acontece por intermédio do combustível a ser queimado, gerando energia térmica em forma de vapor, após isso, gera energia elétrica. O combustível é queimado enquanto o vapor é produzido em uma caldeira. Este vapor gira uma turbina que, por estar interligada ao eixo de um gerador, faz com que o mesmo entre em movimento, e assim gere energia elétrica.

Figura 6: sistema de cogeração da usina termelétrica utilizando biomassa.



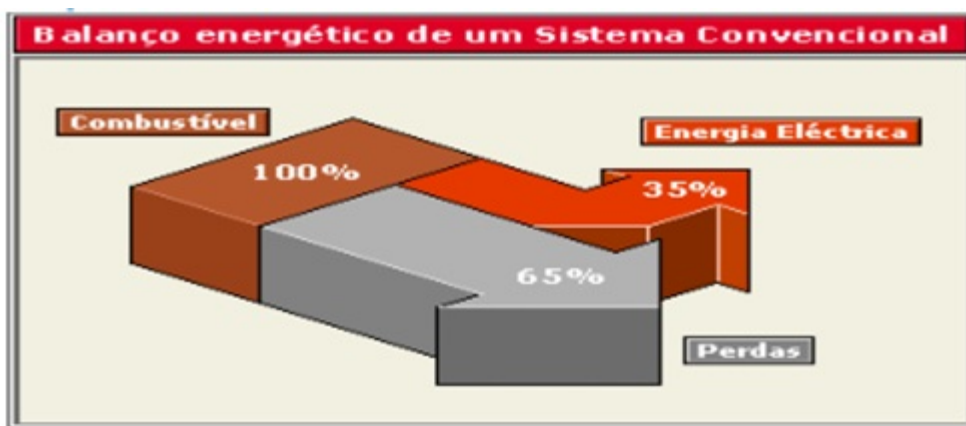
Fonte: Sathel (2017).

As usinas que operam com caldeiras de baixa pressão geram excedentes de bagaço de cana-de-açúcar. Mesmo depois do atendimento do processo interno de energia, existe uma fração excedente que tem uma representatividade considerável do total de bagaço de cana-de-açúcar produzido (MARTELIANO, 2017), fração que é frequentemente negociada entre as usinas. A Usina da Cooperativa Agroindustrial de

Maringá, para citar um exemplo, compra bagaço de cana-de-açúcar de outra usina, para alimentar as caldeiras durante a entressafra.

Ainda sobre a cogeração nas usinas, fez-se uma comparação entre o sistema convencional com o de cogeração. Pode-se dizer que, no caso da cogeração, existe maior aproveitamento da energia do combustível empregado. Já no sistema convencional, 65 % da energia do combustível fóssil é transformada em calor e perdida para o ambiente, e apenas 35 % é utilizada na geração de energia elétrica (TOMAZ *et al.*, 2016).

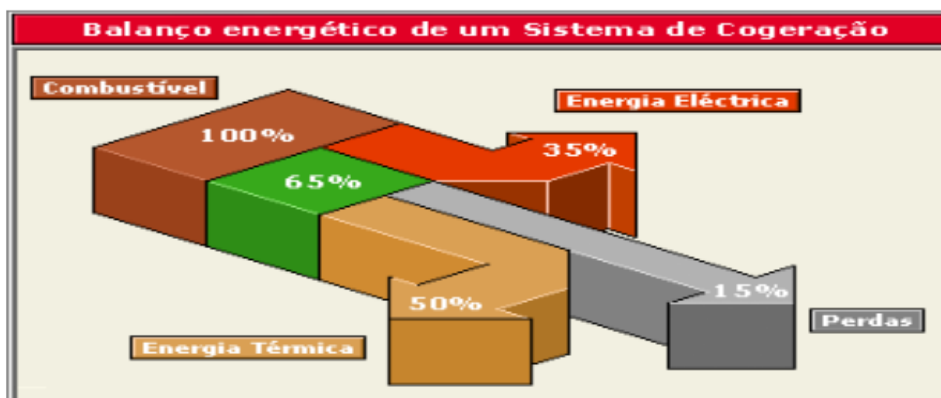
Figura 7: Esquematização do sistema convencional de produção de Energia Elétrica.



Fonte: TOMAZ *et al.* (2016).

No sistema de cogeração, exclusivamente 35 % são utilizados na geração de energia elétrica, mas essa perda de energia cai para 15 %, simplesmente porque os 50 % remanescentes são transformados em energia térmica e aplicados no processo (TOMAZ *et al.*, 2016).

Figura 8: Esquematização do sistema de cogeração.





Fonte: TOMAZ *et al.* (2016).

É de suma importância ressaltar que o método de cogeração é, antes de tudo, uma ação de uso racional de energia, tendo em vista, que o rendimento do método de geração de energia é elevado a partir da produção combinada, oferecendo um melhor aproveitamento no conteúdo energético do combustível básico (TOMAZ *et al.*, 2016).

2.6 – Análises físico-químicas da biomassa

A seguir serão apresentados conceitos e princípios que fundamentam a importância da avaliação do balanço energético no processo da geração de energia elétrica na contextualização deste trabalho.

2.6.1 – Teor de umidade

De acordo com Rabelo (2010), o objetivo da análise de umidade é medir a quantidade de água e outros componentes voláteis presentes na biomassa. O teor de combustibilidade de uma biomassa, expresso a partir da sua degradação térmica, pode ser definido como o quanto da amostra possui composição química favorável à produção de energia (GONÇALVEZ, 2010).

Teores elevados de umidade dificultam e oneram os custos de transporte, a secagem, o armazenamento e a manipulação das biomassas, com influência negativa no poder calorífico (CHARLTON *et al.*, 2009).

A influência do potencial calorífico da biomassa é devida ao fato de que parte da energia liberada no processo é gasta na vaporização da água, ou seja, antes de ocorrer à combustão, é necessário que a umidade diminua. Assim, se o seu conteúdo for muito variável, poderá dificultar no processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema (BRITO, 2007).

O teor de umidade pode ser expresso tanto na base úmida quanto em base seca, e pode ser mensurado pela diferença entre as massas de uma amostra, antes e logo após a mesma ser submetida à secagem (MARCELINO, 2017).



A biomassa originária de produção agroflorestal possui teor de umidade entre 15 e 30 % (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008). Caso seja maior, a quantidade de energia gerada e as temperaturas da câmara de combustão e dos gases de escape diminuirão (ABELHA, 2005).

É notório que a madeira removida de uma floresta, a qual pretende-se usar como combustível, deve ser guardada por algum tempo, para secagem natural. Isto faz com que se tenha um melhor aproveitamento e uma melhor eficiência energética, uma vez que, quanto menor a umidade, melhor é a combustão.

Ainda, de acordo com Brito (2007), nas condições do Estado de São Paulo, o teor de umidade da madeira de eucalipto que chega à indústria apresenta, em média, um valor que varia entre 30 % e 40 % e uma densidade básica em torno de 0,5 t/



Outra forma de se obter o PCS é através de expressões matemáticas fundamentadas na análise elementar da biomassa (Carbono, Oxigênio e Hidrogênio) e também pela análise imediata (Carbono fixo e material volátil).

O poder calorífico correlaciona-se negativamente com a umidade presente na biomassa residual. Logo, é importante a secagem para que o combustível contenha teores adequados para o processo de combustão (FURTADO et al., 2012). O poder calorífico é influenciado pelo teor de umidade, constituição química do combustível e, principalmente, pelo teor de lignina e de extrativos contidos na biomassa (SANTIAGO; RESENDE, 2014).

De acordo com Brito (1993), uma maneira para obter o PCI, é através da fórmula: $PCI = PCS - 600 (9H/100)$, que elimina a interferência do vapor de água produzido na combustão do hidrogênio (H), presente no material em combinação com o oxigênio. A maioria dos sistemas de utilização da biomassa para a geração de energia não seca o material abaixo de 10 % de umidade. No entanto, o poder calorífico que melhor se aproxima da realidade é o PCU, que deriva do PCI, considerando um dado teor de umidade. De acordo com o Vale et al., (2000), é calculado pela equação (1):

$$PCU = PCI [(100 - u) / 100] - 6u \quad (1)$$

Em que:

PCU- poder calorífico útil (cal/g)

PCI- poder calorífico inferior (cal/g)

u- umidade do material (%)

Conforme Mesny (1967), o poder calorífico (



Tabela 2: Variação do poder calorífico conforme o tempo de estocagem e o teor de umidade da lenha.

Tempo de Estocagem (meses)	Teor de Umidade (%)	Poder Calorífico (kcal.kg⁻¹)
Recém colhido	54	1.646
2	43	2.204
4	34	2.624
6	32	2.746

Fonte: Adaptado de Brand (2013).

O comparativo entre várias fontes de energia em termos de poder calorífico realizado por Santos; Yamagata e Mello Castanho (2014) é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Comparativo entre o poder calorífico de várias fontes de energia.

Fonte de Energia	Poder Calorífico (kcal.kg⁻¹)
GLP	11.900
Diesel	11.000
Carvão	7.500
Etanol	7.000
Biogás	6.500
Bagaço	4.000

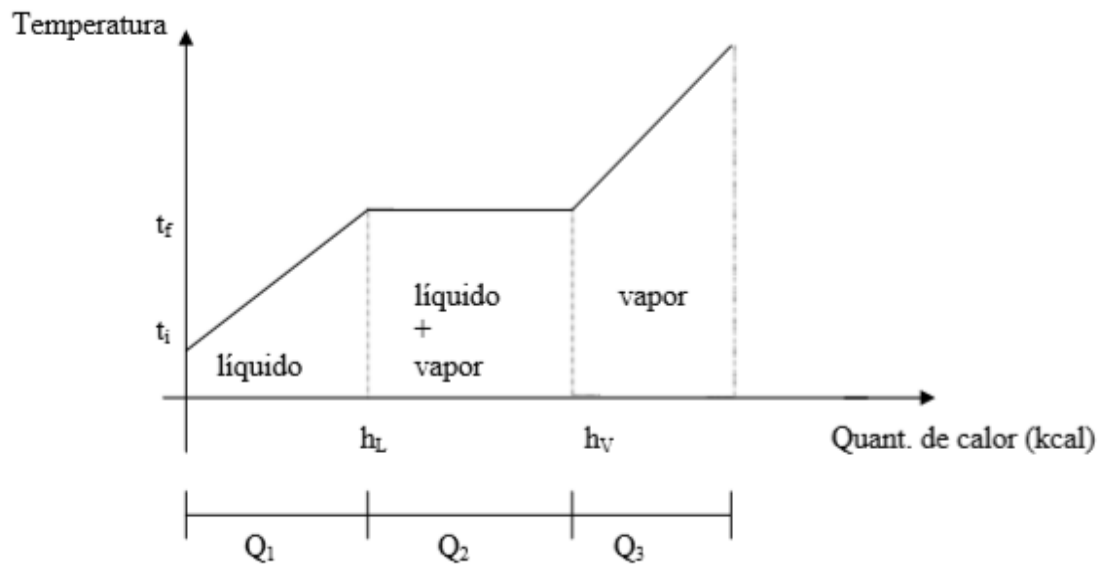
Fonte: Adaptado de Santos; Yamagata e Mello Castanho (2014).

2.6.3 – Processo de produção do vapor

O calor desprendido na combustão, durante a queima do combustível, aquece a água e, logo após atingir a temperatura de vapor, inicia-se a formação do vapor de água que é conhecido como vapor saturado. Cada quilograma de vapor gerado ocupará um



determinado volume, que é denominado volume específico, expresso em





Universidade Estadual de Maringá
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA





$$Q_c = \frac{Q_v(h_v - h_a)}{\eta (PCI)} \quad (3)$$

Em que:

Q_c = quantidade de combustível, ou seja, lenha ou bagaço (kg)

Q_v = quantidade de vapor (kg)

h_v = entalpia do vapor em função da pressão e temperatura (kcal.kg-1)

h_a = entalpia da água em função da temperatura (kcal.kg-1)

η = rendimento (%)

PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal.kg-1)

3.1.1 – Geração de vapor

No presente trabalho foi analisada uma caldeira geradora de vapor para geração de energia, que é necessária para inúmeros processos na indústria.

O combustível atualmente empregado na caldeira para produzir o vapor de água é o bagaço de cana-de-açúcar. O estudo teve como referência o consumo de bagaço usado para determinar a quantidade, em toneladas, de vapor produzido mensalmente, durante os anos de 2013 a 2015. Tais dados foram utilizados para determinar a quantidade de lenha necessária para produzir a mesma quantidade de vapor e simular a substituição total e/ou parcial do bagaço de cana-de-açúcar por lenha.

3.1.1.1 – Característica do sistema de geração de vapor

A caldeira considerada é do tipo MD/FN-85, caldeira horizontal de circuito misto e flamotubular, para combustíveis sólidos.

O gerador de vapor utilizado pela empresa traz uma série de inovações que permitem operacionalização e manutenção rápida e simples, garantindo maior rendimento. Pela Tabela 4, pode-se observar as informações técnicas da caldeira.



Tabela 4: Informações técnicas da caldeira.

Caracterização da Caldeira	
Caldeira	Dan Power
Modelo	MD/FN-85
Produção Nominal de Vapor	225 t/h
Produção Máxima de Vapor	235 t/h
Pressão de Trabalho	67 kg/cm ²
Tipo da Água alimentada	Desmineralizada
Temperatura da Água de Alimentação	127 °C
Condições de Vapor	Superaquecido
Temperatura do Vapor	515 °C
Combustível	Bagaço de cana-de-açúcar
Umidade	50 %
Poder Calorífico Superior	1.791 kcal/kg
Poder Calorífico Inferior	102.300 kg/h
Rendimento ao PCI	86,63 %

Fonte: Databook do fabricante de caldeiras (2009).

3.1.2 – Referência do consumo mensal da caldeira

De acordo com os materiais usados para levantamento de dados que foram imprescindíveis para a pesquisa. As planilhas dos dois últimos anos referentes ao consumo da caldeira, apresentando o consumo mensal e/o os valores dos combustíveis.

De acordo com Mitamura (2005), o tratamento da água é necessário para evitar problemas como corrosão, devido aos gases dissolvidos na água (vapor), incrustação, que são os depósitos de sílica no interior da caldeira ou superfície de aquecimento e



arraste, que é a presença de água no vapor que sai da caldeira para o consumo, evitando, assim, os acidentes com perda da caldeira e também de vidas humanas.

Tendo em vista as instruções do fabricante, a água de alimentação de uma caldeira influencia diretamente na vida útil do equipamento. Para que seja garantido um bom desempenho e longa vida do equipamento, torna-se necessário fazer análise química da água por um laboratório qualificado, que forneça as necessárias informações sobre a necessidade e o tipo de tratamento a ser aplicado.

Por meio do sistema de estoque que a empresa utiliza obteve-se dados que demonstram o consumo mensal e o custo em reais das fontes energéticas utilizadas no processo. A Tabelas 5 mostra o consumo mensal do cavaco e do bagaço de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2015, para produção de vapor. Nesses valores já está incluído o custo de transporte.

Tabela 5: Quantidade mensal dos combustíveis consumidos e despesa em reais (R\$).

Mês/Ano	Cavaco		Bagaço	
	m ³	R\$	m ³	R\$
ago/13	21.000	1.995.000		
set/13	19.000	1.805.000		
out/13	22.000	2.090.000		
nov/13	21.000	1.995.000		
dez/13	19.000	1.805.000		
ago/14			23.000	2.760.000
set/14			24.000	2.880.000
out/14			23.000	2.760.000
nov/14			24.000	2.880.000
dez/14			21.000	2.520.000
jan/15			22.000	2.640.000
fev/15			24.000	2.880.000

Fonte: Marteliano (2017).



3.1.3 – Poder Calorífico Inferior (PCI) e umidade dos combustíveis

O Poder Calorífico Inferior varia de acordo com a umidade do combustível. A determinação teórica da quantidade de lenha consumida na caldeira, em m³ por hora, para produzir o vapor necessário, foi obtida a partir do consumo real do bagaço de cana-de-açúcar, utilizando-se o Poder Calorífico Inferior de cada um desses combustíveis, com teores de umidades iguais.

Destarte, estimou-se a umidade da lenha, levando em consideração que é importante estar em torno de 30 %. De acordo com Brito (1986), em base úmida, num limite situado, aproximadamente, em 65 %, a madeira deixa de ser considerada como combustível, devido à quantidade de água. O aproveitamento é considerado eficiente para uma percentagem inferior a 45 %, ou seja, quanto menor for o teor de umidade mais eficaz será o aproveitamento energético.

Para a determinação do teor de umidade das biomassas utiliza-se, para a lenha, como referência a norma ABNT NBR 14929:2003, o método de secagem em estufa, ou método gravimétrico, realizado por meio de pesagens anteriores e posteriores a permanência das amostras em estufa de secagem a temperatura de 105 ± 3 °C.

3.1.3.1 – Cálculo do Poder Calorífico dos combustíveis com umidade até 45 %

O Poder Calorífico Inferior e a Densidade (Peso Específico) do bagaço de cana-de-açúcar, cavaco e da lenha, com umidade até 45 %, foram obtidos através de interpolação dos dados coletados na pesquisa e cálculos embasados na literatura. A Tabela 6, apresenta as informações.



Tabela 6: Poder Calorífico Inferior (PCI) e Densidade do bagaço de cana-de-açúcar, cavaco e lenha.

	Lenha	Bagaço de Cana-de-açúcar	Cavaco
Origem	Resíduo Florestal	Resíduo Florestal	Madeira das Serrarias
Umidade (%)	16 a 30	35 a 45	16 a 30
Poder calorífico (kcal.kg ⁻¹)	2.500 a 3.500	2.000 a 2.400	2.600 a 3.200
Massa Específica (kg.m ⁻³)	250 a 600	380 a 420	340 a 400

Fonte: Adaptado de Opção Verde - Resíduos Florestais.

3.1.4 – Cálculo do Poder Calorífico Inferior da lenha

Usando a lenha como combustível, utilizando um teor de umidade de 20 %, avaliou-se o Poder Calorífico Inferior por meio de interpolação de dados, usando-se os valores de Mitamura (2005), 3.680 kcal.kg⁻¹ para lenha com 12 % de umidade e 2.400 kcal.kg⁻¹ para a lenha com 40 % de umidade.

3.2 – Avaliação econômico-financeira

A avaliação foi realizada em uma usina de cogeração da região norte do Paraná. A usina estudada produz e exporta energia na modalidade de produtor independente.

. A priori, a empresa tinha a intenção de usar o bagaço de cana-de-açúcar como combustível, uma vez que ele tinha um custo insignificante.



Por outro lado, a quantidade necessária de lenha para a geração do mesmo volume de vapor, usando como referência a umidade e o respectivo Poder Calorífico Inferior (PCI), foi obtida adotando-se o processo baseado em cálculos a partir dos dados reais disponibilizados, referentes ao consumo de bagaço que a caldeira utiliza na produção do vapor, com 67 bar de pressão.

Averiguada a quantidade de lenha que seria consumida por hora, foram iniciadas as inserções de bagaço de cana-de-açúcar e lenha na caldeira, para avaliar a produção de vapor, a oscilação de pressão e a temperatura do vapor superaquecido e a manutenção do estoque do combustível. As inserções da lenha iniciaram com a proporção de 36 % do consumo de bagaço de cana-de-açúcar pela caldeira, variando a dosagem para cada teste, até atingir em torno de 27 a 38 % da biomassa, como pode-se ver na Tabela 8.

Tabela 8: Valores obtidos durante a inserção da mistura da lenha e o bagaço de cana-de-açúcar na caldeira.

Teste	Dosagem Lenha (t/h)	Lenha Dosada (%)	Vazão Vapor (t/h)	Desvio Bagaço
1	27	36	144	35
2	28	35	153	40
3	24	29	158	35
4	25	31	153	40
5	29	35	160	30
6	28	35	153	37
7	23	27	162	30
8	23	28	156	30
9	28	35	153	37
10	23	39	151	35
11	30	38	153	35

Fonte: Laudos de análise térmica fornecidos pela empresa.

3.3 – Avaliação dos Impactos Ambientais

A avaliação dos impactos ambientais foi realizada por meio de uma pesquisa de campo e visitas técnicas. Para a obtenção dos dados práticos foram realizadas



entrevistas com técnicos, encarregados e supervisores. Estas visitas aos setores da indústria de cogeração aconteceram até o segundo semestre de 2018.

Nas visitas técnicas aos setores da indústria de cogeração buscou-se fazer os levantamentos dos aspectos e impactos ambientais por meio do uso de planilhas para enumerar as ações, produtos ou serviços viventes nos setores e, por conseguinte, seus impactos. Foram considerados os efluentes, o consumo de recursos naturais, os resíduos e as emissões atmosféricas. Foram considerados, também, os setores de recepção industrial concernente a biomassa, caldeira e manutenção.

Esta etapa do processo produtivo consiste no transporte do combustível até o pátio industrial e depois o descarregamento na caldeira. Este subproduto é a matéria-prima para produção de vapor que faz o acionamento das turbinas que faz acionar importantes equipamentos da usina, como os desfibradores, as moendas, os exaustores, as bombas de água e os geradores de energia elétrica, que é fornecida a todos os setores da indústria. Também se avaliou outros setores, como o gerenciamento da tecnologia, o controle da caldeira dentre outros.

Após as visitas, os setores foram identificados, enumerados e relacionados aos seus respectivos impactos. Considerando os limites estabelecidos pela SEMA n° 16 do Instituto Ambiental do Paraná, para obter o grau de significância, foram utilizados alguns critérios:

- **Tempo do Aspecto** - distingue primeiramente o período em que o aspecto implicará em um impacto bom ou mau ao meio ambiente, de acordo com o período, sendo que o termo (P) faz referência ao passado, ocorrendo no presente em decorrência de um aspecto do passado. (A) faz referência ao tempo atual, e é o impacto decorrente de um aspecto atual e (F) faz referência ao futuro, e é o impacto previsto de acordo com modificações e implementações feitas nas atividades no futuro.
- **Circunstância Operacional** – refere-se a situações rotineiras na execução das atividades. Toda tarefa realizada resulta em um aspecto ambiental, sendo que (N) Normal demonstra a circunstância prevista na execução da tarefa e (E) Emergência demonstra a circunstância que não deveria ocorrer durante a execução da tarefa, como falhas operacionais, falhas em equipamentos ou processos inadequados que podem acarretar em riscos de acidentes com interferência direta ao meio ambiente.



- **Temperamento do impacto:** tem como objetivo analisar se o impacto ambiental é positivo ou negativo.
- **Gravidade do Impacto:** Destina-se a fazer a avaliação da magnitude ou extensão do impacto, sendo possível reverter ou não o dano causado ao meio ambiente, e deve ser pontuado de acordo com a gravidade do impacto. Frequência (F) e Probabilidade (P): Determina-se a frequência de acordo com a quantidade de vezes que ocorre o impacto durante um determinado período. Para a pontuação da frequência associa-se diretamente o aspecto à situação normal, e para a probabilidade associa-se a situações emergenciais. O período é determinado de acordo com a frequência do impacto e com a probabilidade de ocorrência.

TABELA 9: Gravidade, frequência e probabilidade de ocorrência dos impactos.

Gravidade	Descrição	Pontuação
Baixa	Impacto com extensão baixa ou que acontece apenas no local de origem e com probabilidade total de reversão.	1
Média	Impacto considerável e com possibilidade de prejudicar o meio ambiente, estragos limitados a áreas da empresa.	2
Alto	Grande prejuízo ao ambiente impacto com grande extensão	3
Frequência	Descrição	Pontuação
Baixa	Acontecimento semanal ou maior	1
Média	Acontecimento diário até semanal	2
Alta	Acontecimento contínuo	3
Probabilidade	Descrição	Pontuação
Baixa	Acontecimento igual ou inferior a uma vez a cada ano	1
Média	Acontecimento superior a uma vez ao ano e inferior a uma vez ao mês	2
Alta	Acontecimento superior ou igual a uma vez ao mês	3



Fonte: Adaptado de Cruz (2014).

O grau de significância procede do cálculo dos aspectos e seus referentes impactos. A pontuação da significância (**Tabela 10**) dos impactos é a multiplicação da pontuação concedida à gravidade e frequência/probabilidade para cada aspecto, constituindo os aspectos ambientais significativos aqueles determinados com suporte na pontuação obtida (6 a 9 pontos), segundo os critérios acima.

TABELA 10: Grau de significância dos impactos.

Gravidade Frequência/Probabilidade	Baixa (1)	Média (2)	Alta (3)
Baixa (1)	Grau 1 Não significativo (NS)	Grau 2 Menor (ME)	Grau 3 Moderado (MO)
Média (2)	Grau 2 Menor (ME)	Grau 4 Moderado (MO)	Grau 6 Maior (MA)
Alta (3)	Grau 3 Moderado (MO)	Grau 6 Maior (MA)	Grau 9 Crítico (C)

Fonte: Adaptado de Cruz (2014).



4 – RESULTADOS

A seguir, apresenta-se os resultados obtidos a partir do comparativo técnico e científico do uso da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar com relação a lenha para a geração de energia elétrica. Analisou-se do ponto de vista econômico (custos) e energético, para verificar se é viável a substituição da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar por lenha.

4.1 – Análises físico-químicas da biomassa

Na avaliação do balanço energético no processo da geração de energia elétrica na contextualização deste trabalho, é importante ressaltar que quanto menor for a umidade melhor será a eficiência energética da caldeira.

Portanto, teores altos de umidade impedem e oneram os preços de transporte, a secagem, o armazenamento e a manipulação das biomassas, influenciando negativamente no poder calorífico (CHARLTON et al., 2009).

4.2 – Análise econômico-financeira

Na Tabela 11 são exibidos os resultados dos cálculos do PCI e do consumo, utilizando 100 % do bagaço de cana-de-açúcar obtidos a partir das equações (3). Os



resultados para a utilização da lenha foram calculados levando em conta o uso de 100 % desse combustível para a geração de vapor necessário.

TABELA 11: Comparativo do uso de 100 % do bagaço de cana-de-açúcar ou 100 % de lenha como combustível.

Dados	Unidades	Lenha	Bagaço de cana-de-açúcar
Consumo Específico	t	3,30	2,00
Consumo de matéria-prima	t/h	38,53	66,31
Eficiência poder calorífico	%	80,00	80,00
Entalpia água de alimentação	kcal/kg	115,24	115,71
Entalpia do vapor a 550 °C e 67 bar	kcal/kg	844,21	844,21
POL bagaço	%	-	1,47
Poder calorífico inferior	kcal/kg	3.000,00	1.744,31
Preço da matéria-prima	R\$/t	150,00	70,00
Preço de venda da energia elétrica	R\$/MW	388,44	388,44
Produção de vapor	t/h	126,80	126,80



O consumo do combustível pela caldeira foi calculado por meio da equação (3), embasado a partir de uma produção média de vapor de 126,80 t/h referente ao histórico.

O rendimento foi estimado em 80 %. Para o cálculo das entalpias, segundo Sonntag et al. (2003), utilizou-se 844,21 kcal/kg para o vapor superaquecido a 550 °C e 67 bar e 115,24 kcal/kg para a água de alimentação na temperatura de 115 °C.

Analisando a quantidade de lenha necessária para geração da mesma quantidade de vapor em condições normais de queima com bagaço de cana-de-açúcar, para cada 1 (uma) tonelada de lenha utilizada, tem-se uma produção de 3,30 toneladas de vapor. Em contrapartida, utilizando o bagaço de cana-de-açúcar, produz-se aproximadamente 41 % menos, ou seja, 2,00 toneladas de vapor, o que ocasiona, ainda, um consumo menor de lenha, de 38,51 t/h, em relação ao consumo de bagaço de cana-de-açúcar, que é de 66,24 t/h.

Para a avaliação econômica, computou-se dados referentes ao valor de compra da tonelada de biomassa, considerando os impostos e a receita bruta gerada com a venda da energia elétrica produzida, os quais foram apurados internamente, assim como pode-se observar na Tabela 12.

TABELA 12: Economia do uso de 100 % de bagaço de cana-de-açúcar ou 100 % de lenha de como combustível.

Dados	Unidades	Lenha	Bagaço de cana-de-açúcar
Gasto com matéria-prima	R\$/h	5.777,07	4.636,73
Energia exportada	MW/h	20,00	20,00
Receita bruta gerada com venda energia elétrica	R\$/h	7.769,60	7.769,60
Custo de oportunidade com venda matéria-prima	R\$/h	-	4.636,73
Impostos (9,25 % PIS/COFINS)	R\$	718,69	718,69
Resultado Líquido	R\$	1.273,84	2.414,18



Resultado Bruto	R\$	1.992,53	3.132,87
Resultado Líquido	R\$/t	33,07	36,45
Efeito caixa	R\$/t	51,74	47,3

Os resultados consoantes ao valor da tonelada das biomassas como apresentados na Tabela 12. A lenha tem um valor comercial de compra pouco mais que 50 % do valor do bagaço de cana-de-açúcar. Todavia, a quantidade de lenha necessária para produzir a mesma quantidade de vapor é de 126,80 t/h, ou seja, menor, com um rendimento de R\$ 51,74 por tonelada de lenha. Para o bagaço de cana-de-açúcar o valor é de apenas R\$ 47,30 por tonelada. Para tal, há um incremento de capital em torno de 8,58 % em relação ao bagaço de cana-de-açúcar, levando em conta o fluxo de caixa obtido com a venda de 20 MW de energia elétrica a R\$ 388,48/MW. Assim, o uso de 100 % de lenha como combustível é mais viável que a utilização de 100 % de bagaço de cana-de-açúcar, devido ao fato de se ter um fluxo de caixa melhor, mesmo com um valor comercial de compra maior.

4.3 – Análise dos impactos ambientais

A seção de recebimento do combustível (bagaço de cana-de-açúcar e outros) alcançou um índice moderado para a maioria dos seus impactos. Apenas o estoque do subproduto foi enquadrado como não significativo e positivo, conforme Tabela 13.

TABELA 13: Resultados da classificação dos impactos ambientais identificados na seção de recebimento do combustível da usina de cogeração.

ASPECTOS	IMPACTOS	TEMPORABILIDADE	SITUAÇÃO OPERACIONAL	BENÉFICO ADVERSO	GRAVIDADE	FREQUÊNCIA/PROBABILIDADE	PONTUAÇÃO	RESULTADO
Estoque de Subproduto	Biomassa para gerar energia	A	R	+	1	1	1	NS



Geração de Resíduos Sólidos	Alteração na qualidade do solo	A	R	-	2	2	4	MO
Geração de Gases Poluentes	Alteração na qualidade do ar	A	R	-	2	2	4	MO
Emissão de Ruído	Incômodo aos vizinhos	A	R	-	2	2	4	MO

Conferindo na legenda:

- [A] - Atual;
- [+] – Benéfico;
- [-] - adverso;
- [R] - Situação rotineira;
- [NS] - Não Significativo;
- [MO] - Moderado.

A geração de resíduos se enquadrou em grau moderado, pois na usina esse recurso advém do combustível usado, somente repondo o estoque de tempos em tempos para o processo. Quanto à geração de poluentes, esta teve sua classificação pontuada como de grau moderado. Tendo em vista que o bagaço de cana-de-açúcar, a priori, tinha um preço insignificante para a usina, além de ser um dos subprodutos mais abundantes decorrentes deste processo, torna-se fundamental o uso desse subproduto na produção, tornando as usinas autossuficientes em energia elétrica.

Na seção da caldeira, foram observados diversos aspectos ambientais, sendo a maioria considerados moderados. Na inspeção efetuada na seção da caldeira, foi apurado que os impactos de emissão de calor, emissão de material particulado (fuligem), descarte final de óleos, graxas e estopas contaminadas e emissão vapor possuem grau moderado.



O consumo de água para lavagem de gases e o consumo de energia elétrica foram considerados como impactos de grau menor. Somente o consumo de água (geração de vapor) e emissão gases poluentes se enquadraram como impactos de maior grau. O único impacto considerado como não significativo e positivo foi o descarte final de material particulado (cinza de caldeira), resultante do processo de lavagem de gases, pois pode ser utilizado nas lavouras de cana-de-açúcar. O consumo de água para produção de vapor foi considerado um impacto de grau maior, tendo em vista que a água é utilizada de acordo com a necessidade de vapor.

Weber et. al (2010) lembram a importância de se colocar ferramentas de conservação desse recurso hídrico, tendo em vista que a escassez pode ser solucionada reduzindo assim esse consumo abundante de água na indústria. Já o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 382 de 26 de dezembro de 2006, exige do setor sucroalcooleiro a implantação de tecnologias, tais como o uso de lavadores de gases, que busquem atender aos parâmetros de emissão de gases poluentes e material particulado. Observou-se que o sistema de lavagem de gases minimiza o teor de emissão de gases poluentes e material particulado para atmosfera. Contudo, verificou-se que este impacto se enquadra em grau maior, pois esse sistema efetuado pela empresa não restringe toda a emissão de gases, restando assim um residual que emitido de forma contínua, causando impacto ao meio ambiente.

O descarte final de material particulado resultante do processo de lavagem de gases, nesse caso a cinza de caldeira, foi considerado como não significativo e positivo, pois é utilizado no solo como adubo. A disposição de resíduos industriais de usinas sucroalcooleiras no solo é uma alternativa de descarte interessante, e muitas vezes até é viável do ponto de vista econômico, desde que seja bem manejado, conhecendo as relações entre o resíduo e solo que o recebe. (CAMARGO et al., 1984).



Tabela 14: Resultados da classificação dos impactos ambientais identificados no setor da caldeira da usina de cogeração.

ASPECTOS	IMPACTOS	TEMPORARILIDADE	SITUAÇÃO OPERACIONAL	BENÉFICO ADVERSO	GRAVIDADE	FREQUÊNCIA APROBABILIDADE	PONTUAÇÃO	RESULTADO
Consumo de Eletricidade	Esgotamento de recursos naturais	A	R	-	2	2	2	ME
Descarte de cinza	Alteração da qualidade do solo	A	R	+	1	1	1	NS
Consumo de Água	Esgotamento de recursos naturais	A	R	-	3	2	6	MA
Emissão de calor	Alteração da Temperatura	A	R	-	2	2	4	MO
Emissão de material particulado	Alteração na qualidade do ar	A	R	-	2	2	4	MO



Emissão de gases Poluentes	Alteração na qualidade do ar	A	R	-	2	3	6	MA
Descarte de graxas e óleos	Alteração na qualidade do ar	A	NR	-	2	2	4	MO
Emissão de vapor	Alteração na qualidade do ar	A	E	-	2	2	4	MO

Legenda:

- [A] - Atual;
- [+] – Benéfico;
- [-] - adverso;
- [R] - Situação rotineira;
- [MA] - Maior;
- [ME] - Menor;
- [NS] - Não Significativo;
- [MO] - Moderado.

Nas pesquisas de campo os colaboradores do setor de montagem e manutenção, foi identificada uma prática de descartar efluente industrial (óleo diesel) na caldeira, ocorrendo o mesmo com resíduos sólidos (estopas contaminadas). Ressalta-se que a caldeira não é preparada para este fim, causando assim aumento da poluição do ar durante a ocorrência desses eventos. Dessa maneira, este impacto foi pontuado como moderado, por se tratar-se de um evento esporádico.

Já para o setor de manutenção, verificou-se que a maioria dos impactos ambientais podem ser considerados moderados, pois trata-se de um setor que não envolve o processo de moagem, ocorrendo apenas a manutenção dos equipamentos da indústria no período de entressafra. Como observado nos setores anteriores, o consumo de energia elétrica neste setor foi considerado de grau menor, pois utiliza-se a caldeira para produzir vapor e com isso, movimentar os geradores de energia e abastecer o funcionamento do setor. Identificou-se também o uso de produtos químicos para equipamentos de solda e



maçaricos, gerando risco de emissão de gases poluentes, constituindo assim um impacto de grau maior.

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos resultados obtidos e nas discussões apresentadas neste trabalho, pode-se dizer que para as condições dos preços dos combustíveis envolvidos, no período em estudo, a análise econômico-financeira mostrou que para produzir o vapor necessário a lenha foi o que gerou mais custo. Em contrapartida, se usa menos lenha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar para a geração da mesma quantidade de vapor. Embora ainda tímida na matriz elétrica brasileira, a utilização de lenha como combustível para centrais termelétricas está crescendo, o que pode ser observado nos setores públicos e privados, assim como o protocolo de kyoto. A tecnologia de geração já é amplamente dominada, e sua disseminação dependerá de sua competitividade perante outras fontes. Ao comparar a competitividade econômico-financeira da utilização da lenha como combustível complementar em usinas do setor sucroalcooleiro frente ao bagaço de cana-de-açúcar, os resultados da análise, apontam a lenha sendo o combustível mais vantajoso em relação a eficiência energética e/ou potencial calorífico.

As principais vantagens da utilização residem na aplicação de um combustível para o qual o sistema de cogeração foi projetado. Os operadores estão acostumados e não requer qualquer adaptação dos equipamentos. Por outro lado, a disponibilidade de



bagaço de cana-de-açúcar comprado de outras usinas é limitada em regiões que concentram, além das próprias usinas, outras indústrias que utilizam bagaço de cana-de-açúcar. Porque a demanda por este combustível é maior, o preço tende a aumentar, reduzindo a viabilidade da geração de eletricidade no período de entressafra.

Apesar da lenha requerer algumas adaptações e controles na operação do sistema de cogeração, é um combustível disponível durante todo o ano, armazenável e que pode ser adquirido de diversos fornecedores. Cuidados a serem observados dizem respeito à qualidade e a legalidade da origem da lenha (que não seja proveniente de corte ilegal). Aumentando a participação da biomassa florestal no mercado de energia elétrica depende fortemente da adequação de critérios dos leilões de energia para a biomassa florestal, por parte do governo, bem como da maior qualidade e integração dos projetos, por parte dos investidores e produtores florestais.

O estímulo a novos projetos de energia de biomassa florestal tem potencial de gerar impactos econômicos, sociais e ambientais, com crescimento e diversificação de renda no meio urbano e rural, geração de emprego, tributação e endereçamento de questões ambientais.

A análise energética mostrou que o teor de umidade tem influenciado muito para que se consiga um ótimo rendimento, uma vez que, o rendimento chegou na casa dos 80 %. Quanto menor for o teor de umidade maior será o potencial calorífico, uma vez que existe um contributo para fortalecimento da sustentabilidade e eficiência energética, e tendenciado na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Os vários processos para a geração de eletricidade causam impactos ao meio ambiente. No entanto, a maioria dos impactos avaliados foram considerados moderados. Ressalta-se ainda que, com a realização periódica do levantamento de aspectos e impactos ambientais (LAIA) no empreendimento em questão, torna-se possível a identificação dos pontos críticos a serem controlados previamente.

Todavia, como forma de sugestão, recomenda-se a título de motivação e estímulo pelos menos dois aspectos interessantes podem ser antecipados: Aumento da produção da energia elétrica/térmica sem depender apenas do bagaço de cana-de-açúcar ou lenha e manter no mínimo uma exportação de energia cumprindo contratos e tendo lucros; aumentar o poder calorífico inferior da biomassa para ter um rendimento melhor na economia do combustível nas caldeiras, sobrando combustível para cogeração de entressafra.



Apresenta-se também a sugestão de adição no sistema de recuperação de calor, secadores dos combustíveis a fim de reduzir a umidade e elevar o potencial calorífico.

Se sugere também fazer uma análise termodinâmica e ambiental, por meio de indicadores exegéticos, e com os resultados fazer uma análise de otimização, encontrando um ponto ótimo de produção de energia associando ao desempenho ambiental do processo.

6 – REFÊRENCIAS

ABELHA, P. **Emissões gasosas durante a co-combustão de carvão com resíduos.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, 2005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão vegetal – **Determinação do poder calorífico. Método de ensaio. 01.040** – NBR 8633 OUT/1984. Origem: ABNT 1:21.01-002/84. CB-1 – Comitê Brasileiro de Mineração e Metalurgia. CE-1:21.01- Comissão de Estudo de Carvão Vegetal, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14929: **Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa.** 2003. 17p.



ANEEL. BIG: **banco de informações de geração: fontes de energia exploradas no Brasil**. Brasília, DF: ANEEL, 2016. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>> Acesso: 22 setembro. 2017.

BEN. **Balanco energético nacional. 2017**. Disponível em: <
https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2016_Web.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2017.

BEN-IWO, J.; MANOVIC, V.; & LONGHURST, P. **Biomass resources and biofuels potential for the production of transportation fuels in Nigeria**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.63, p.172-192, 2016.

BRAND, M. A. **Influence of species in the quality of forest biomass in storage, for energy generation**. Revista Ambiência, v. 9, n. 3, p. 461–474, 2013.

BRASIL. DECRETO n.º 11.352, de 13 de fevereiro de 1996. **IAP- Controle da Qualidade do Ar**, Curitiba, 15/04/2014. Disponível em:
<www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=117128&codItemAto=781629>. Acesso em: 12/09/2018.

BREALEY, Richard et MYERS, S. C. **Finanças “Corporativas: investimento de capital e avaliação”**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BRITO, J. O. **Expressão da produção da produção florestal em unidades energeticas**. In CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7, 1993, Curitiba, Anais... Curitiba, p. 208-82, 1993.

BRITO, J. O. **Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais**. Sivicutura, v. 11, n. 41, p. 188-193, 1986.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. *Estudos Avançados*, v. 21, n. 59, p.185–193, 2007.



CAMARGO, O.A. et al. **Alterações de características químicas de um Latossolo Roxo distrófico incubado com resíduos da indústria álcool-açucareira.** *Bragantia*, Campinas, vol. 43, n. 01, 1984. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87051984000100011>>. Acesso em: 09 mar 2018.

CHARLTON, A. et al. **The biorefining opportunities in Wales:** Understanding the scope for building a sustainable, biorenewable economy using plant biomass. *Chem. Eng. Res. Des.* v. 87, p.1147–1161, 2009.

COGEN. **Associação da Indústria de Cogeração de Energia.** Disponível em <<http://www.cogen.com.br/cogeracao/conceito-e-tecnologias>>. Acesso em 20/08/2018.

COGEN. Programa Bioeletricidade 2011-2020. Disponível em http://www.cogen.com.br/workshop/2010/Bioeletricidade_20112020_27052010.pdf . Acesso em 02/10/2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana 2018/:** Disponível em: <http://www.conab.org.br>. Acesso em: 20 fev 2019.

CRUZ, F.P.; ARAUJO, W.E.L. **Avaliação dos aspectos e impactos ambientais no setor de abate de um frigorífico em Cachoeira Alta-GO.** *UniRV Online*, Rio Verde-GO, 2014. Disponível em: <<http://revistas.unirv.edu.br/revista/index.php/unirvonline/article/view/18>>. Acesso em: 09 mar 2017.

DE BESI, M; McCORMICK, K. Towards a bioeconomy in : Europe: National, regional and industrial strategies. *Sustainability*, v. 7, n. 8, p. 10461-10478, 2015.

DHILLON, R. S; WUEHLISCH, G. **Mitigation of global warming through renewable biomass.** *Biomass Bioenerg.* v. 48, p. 75 - 89, 2013.



DIPTI; PRIYANKA. **Bioenergy crops an alternative energy**. International Journal of Environmental Engineering and Management, v. 4, n. 3, p. 265–272, 2013. Disponível em <<http://www.ripublication.com/ijeem.htm>>. Acesso em: 15/12/2018.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento Agorecológico da cana-de-açúcar, 2013**. Disponível em: http://www.cnps.embrapa.br/zoneamento_cana_de_acucar/ZonCana.pdf. Acesso em: 20 de abril. 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2016**: Ano base 2015/ Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE,2016.

EQUIPALCOOL SISTEMAS LTDA. **Prontuário e Databook**. São Paulo. Jun. 2009.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **European environment. State and perspectives 2015**. 2015.

FURTADO, T. S., FERREIRA, J. C., BRAND, M. A., & NEVES, M. D. **Correlation between moisture content and energy efficiency of Pinus taeda's residues at different ages**. Revista Árvore, v. 36, n.3, p. 577-582, 2012.

GERMEK, H. A.; PATROCÍNIO, A. B.; SILVA, F. C.; SIMON, E. J., & RÍPOLI, T. C. **Analysis decision about the sugarcane straw recovery for cogeneration in unity operation industry**. Bioenergia em Revista: Diálogos (ISSN: 2236-9171), v.3, n. 2, p. 9–17,2014.

GONÇALVEZ, J. E. 2010. **Avaliação energética e ambiental de bagaço de cana-de-açúcar produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeiras de *Eucalyptus grandis***. Botucatu, 2010.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; CATANEO, A.; SERAPHIM, O. J. . **Estudo teórico sobre cogeração de energia seus equipamentos e ciclos**. In: Fórum Ambiental



da Alta Paulista, 2007, Tupã. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**. Tupã, 2007. V. III. pp. 1-21. 2007.

HAMMERTON, J. et al. **Characterisation of biomass resources in Nepal and assessment of potential for increased charcoal production**. ELSEVIER, v. 223, p. 358–370, 2018.

HÖLDER, D. Bioenergy Utilisation. Apresentação realizada no Seminário Energias Renováveis Brasil-Alemanha: **Aplicação de Tecnologias para Uso Energético da Biomassa/Biogás**. Câmara de Comércio e Indústria Brasil – Alemanha. São Paulo, v. 29.

HUGOT, E. Producción de Vapor. In: **Manual para ingenieros azucareros**. 1.ed.(1977) 4.imp.México: Companhia Editorial Continental, S.A, 1977. p.603-705.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2014**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.iba.org/pt/biblioteca-iba/publicacoes>>. Acesso em: 15 dezembro 2018.

INNOCENTE, A. F. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar: estudo de caso/ Dissertação** – Universidade Estadual Paulista, faculdade de Ciências Agrônomicas. P. 75 a 77, Botucatu, 2011.

MARTELIANO, E. C. **Avaliação de Produção: Gases de Exaustão Caldeira**: Cocamar, 2017. (Cooperativa Agroindustrial de Maringá). Relatório técnico.

MARCELINO, M. M. **Biomassa residual do coco para obtenção de energia e intermediários químicos via gaseificação: caracterização, modelagem e simulação**. Salvador, 2017. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Escola Politécnica de Pós-graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.



MESNY, M. **Caldera de vapor, descripción, teoría, manejo y mantenimiento.** 3.ed. Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina, 1967. 269 p.

MITAMURA, S.S. **Notas de aula. Treinamento de segurança na operação de caldeira, realização Mitamura Engenharia S/S Ltda.** (Apostila). Londrina: 01 de mar. à 05 de abr. de 2005.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal.** In: BARRETO, E.J.F. (Coord). *Combustão e Gaseificação da Biomassa.*

OPÇÃO VERDE. **Resíduos florestais.** Disponível: em www.opcaoverde@sorocaba.com.br/residuosflorestais. Acesso em: 29 novembro de 2018.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais.** Vol. 1. Brasília: Via Brasil, 2002. 32 p.

RABELO, S. C. **Avaliação e otimização de pré-tratamentos e hidrólises enzimática do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração.** Tese (Doutorado em Eng. Química). Faculdade de Eng. Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.

RAGHU, S.; SPENCER, J. L.; DAVIS, A. S., & WIEDENMANN, R. N. **Ecological considerations in the sustainable development of terrestrial biofuel crops.** *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v.3, n.1-2, p. 15–23, 2011.
doi:10.1016/j.cosust.2010.11.005.

SANTIAGO, F. L. S.; DE REZENDE, M. A. **Aproveitamento de resíduos florestais de Eucalyptus spp na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica.** *Energia na Agricultura*, v. 29, n. 4, p. 241-253, 2014.



SANTOS, S. C.; YAMAGATA, C.; MELLO CASTANHO, S. **Lighting by biogas burners: perspectives on development in Brazil.** *Journal of Materials Sciences and Applications*, n. July, p. 660–673, 2014.

SASMAL, S.; GOUD, V. V.; MOHANTY, K. **Characterization of biomasses available in the region of North-East India for production of biofuels.** *Biomass Bioenerg.* v. 45, p. 212 - 220, 2012.

SATHEL. **Energia Elétrica.** Disponível em < <http://www.sathel.com.br/energia-eletrica-e-cogeracao/>>. Acesso em 10/11/2017.

SCHURHADS, P. **Propriedade e produtos energéticos da madeira.** UNIUV- Centro Universitário de União da Vitória, 2008.

SILVA, M. B. e MORAIS, A. S. **Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Comparação; XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção/ A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008, p.3.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e números do Brasil florestal 2015.** Nov. 2015, 107p. Disponível em:
<<http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/SBS-2005.pdf>>. Acesso em: 21/06/2018.

SONNTAG, R. E.; BORGNACKE, C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica.** Tradução da 6ª edição americana, Ed. Edgard Blücher. 2003.

SULLIVAN, T. P.; SULLIVAN, D. S.; LINDGREN, P. M. F.; RANSOME, D. B., BULL, J. G., & RISTEA, C. **Bioenergy or biodiversity? Woody debris structures and maintenance of red-backed voles on clearcuts.** *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n.10, p. 4390 –4398, 2011. doi:10.1016/j.biombioe.2011.08.013.



TOLMASQUIM, Mauricio. Plano Nacional de energia 2030. **Conselho Nacional de Política Energética** - CNPE, Brasília, Brasil, accessed, v. 1, n. 10, 2017

TOMAZ, W. L.; GORDONO, F. S.; SILVA, F. P. **Geração de Energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar: estudo de caso múltiplo no setor sucroalcooleiro**: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2016.

TRIVEDI, J.; AILA, M., BANGWAL, D. P.; KAUL, S., & GARG, M. O. **Algae based biorefinery—How to make sense?** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 47, p. 295–307, 2015. doi:10.1016/j.rser.2015.03.052

TROMBETA, N. C. **Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil - uma aplicação de modelos de localização ótima para fins energéticos**. Piracicaba, 2015. 149 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

UCZAI, P. R.; TAVARES, W. M.; QUEIROZ FILHO, A. P. de. **Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade**. 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Boletim: A Bioeletricidade da cana em Números: ÚNICA 2017/**: Disponível em: <http://www.unica.com.br>. Acesso em: 20 fev 2019

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Boletim: IMPORTÂNCIA NA MATRIZ ELÉTRICA: ÚNICA 2018/**: Disponível em: <http://www.unica.com.br>. Acesso em: 20 fev 2019.

VALE, A. T., BRASIL, M. A. M., CARVALHO, C. M., VEIGA, R. A. **Produção de Energia do Fuste de Eucalyptus Gradiss Hill Ex- Maiden e Acacia Mangium Willd em Diferentes Níveis de Adubação**, v.6, n.1, p. 83-88, 2000.



XU, Y.; ZAEKE, D., VELDEERS, G. J., & RAMANATHAN, V. **The role of HFCs in mitigating 21st century climate change.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, v.13, n.12, p. 6083-6089, 2013.

WEBER, C.C.; CYBIS, L.F.; BEAL, L.L. **Conservação da água aplicada a uma indústria de papelão ondulado.** *Eng. Sanit. Ambient*, Porto Alegre-RS, vol. 15, n. 03, 2010.