

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL**

**NAYANA DE ALMEIDA SANTIAGO**

**VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR: ESTUDO  
DE CASO DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA NO NORDESTE DO BRASIL**

**FORTALEZA**

**2015**

NAYANA DE ALMEIDA SANTIAGO

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR: ESTUDO DE  
CASO DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA NO NORDESTE DO BRASIL

Dissertação apresentada à Coordenação do  
Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e  
Gestão Ambiental do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará  
como requisito para a obtenção do grau de  
Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva  
Coorientador: Prof. Dr. Luís António da  
Cruz Tarelho (Universidade de Aveiro)

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Instituto Federal do Ceará - IFCE  
Sistema de Bibliotecas - SIBI  
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S235v Santiago, Nayana de Almeida.  
Valorização energética do bagaço da cana-de-açúcar : estudo de caso de uma usina sucroalcooleira no Nordeste do Brasil / Nayana de Almeida Santiago. - 2015.  
93 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Tecnologia em Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2015.  
Orientação: Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva.  
Coorientação: Prof. Dr. Luís António da Cruz Tarelho.
1. Resíduo da usina de álcool. 2. Bioenergia. 3. Biomassa. I. Título.

CDD 628

---

NAYANA DE ALMEIDA SANTIAGO

**VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR: ESTUDO DE  
CASO DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA NO NORDESTE DO BRASIL**

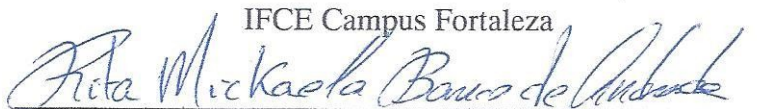
Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal do Ceará como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em 26/03/2015

**BANCA EXAMINADORA**



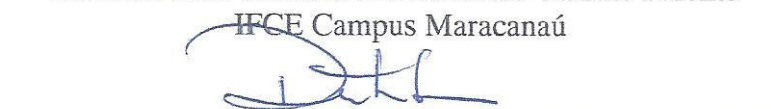
Presidente Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva  
IFCE Campus Fortaleza



Membro Profa. Dra. Rita Mickaela Barros de Andrade  
IFCE Campus Fortaleza



Membro Prof. Dr. Marcelo Monteiro Valente Parente  
IFCE Campus Maracanaú



Membro Profa. Dra. Renata Mendes Luna  
UFC Universidade Federal do Ceará

A Deus.

Aos meus pais, Maria Luziete e Valtenor.

A minha irmã, Natielly.

Ao meu noivo, José Roberto.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus razão da minha vida e fonte da minha alegria, que me deu coragem e disposição para realizar esse estudo.

Aos meus pais, Valtenor Honorato de Santiago e Maria Luziete de Almeida Santiago, que sacrificaram seus dias a fim de oferecer todos os recursos necessários para minha formação pessoal e profissional. Agradeço aos princípios pacientemente ensinados e devidamente aprendidos que me tornaram a mulher que sou. Amo-vos intensamente.

A toda minha família que sempre me apoiou e acreditou no meu potencial, dando-me sempre força e motivação. De modo especial agradeço a minha irmã, Natielly de Almeida Santiago, responsável pelos meus risos fáceis que ela consegue tirar das situações mais inusitadas.

Ao meu noivo, José Roberto da Silva Nepomuceno, que sempre me incentivou. Desejo permanecer por toda minha vida ao seu lado, dedicando-lhe minhas conquistas.

A minha fiel companheira de pesquisa Patrícia Moreira Silveira pelas motivações, entusiasmo e principalmente pelas críticas construtivas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental pelo apoio intelectual e emocional, aqui lembro toda equipe na pessoa da Cledina.

Aos meus colegas mestrado, pelos momentos de alegria e tensão compartilhados, nas pessoas da Alyce, Carolina, Luiz Carlos, Doris, Emmanuel, Phyllipe e Tailena.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adeildo Cabral (IFCE) que além de me orientar, me estimulou a superar meus limites.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Luís Tarelho (Universidade de Aveiro), por acreditar no meu trabalho e me dar as instruções necessária.

A Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Rita Mickaela Barros de Andrade (IFCE), ao Prof. Dr. Marcelo Monteiro Parente (IFCE) e a Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Renata Mendes Luna (UFC) pelas ricas sugestões dadas a este trabalho.

Ao Sr. Arlindo Nunes da Silva Filho responsável pela usina Japungú, estudo de caso da presente pesquisa, pela atenção e disponibilização dos dados da usina, fundamental para realização desse trabalho.

A equipe de bibliotecárias da Universidade Federal do Ceará (UFC), na pessoa da Juliana Lima, pela atenção e colaboração na formatação desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) e ao Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental do IFCE pela infraestrutura cedida.

A Universidade de Aveiro, departamento de ambiente e ordenamento, pelo acolhimento e a grande oportunidade de aprimorar meus conhecimentos refletindo ativamente no resultado final dessa pesquisa.

“Expresso a mais profunda confiança de que, apesar de toda a minha debilidade, o Senhor conceder-me-á todas as graças necessárias para enfrentar segundo a Sua vontade qualquer tarefa, provação e sofrimento que quiser pedir ao Seu servo, ao longo da vida.”

(São João Paulo II)

## RESUMO

Na busca pela sustentabilidade as fontes de energias renováveis surgem como opção para substituir as fontes convencionais. As fontes alternativas provocam menor impacto ambiental negativo quando comparadas com as tradicionais (petróleo, gás natural e carvão mineral). Dentro do contexto das energias renováveis este trabalho tem como objetivo principal analisar a valorização energética do bagaço da cana-de-açúcar na região nordeste do Brasil. Foi identificado o estado da arte dentro do campo de investigação da pesquisa e levantadas as potencialidades e fragilidades ao longo da cadeia de valorização do bagaço. Nesta dissertação será apresentada como estudo de caso uma usina sucroalcooleira localizada no Estado da Paraíba. A destilaria gera 60 toneladas de bagaço por hora, do qual utiliza 48 ton/h para alimentar a caldeira, as restantes 12 ton/h de bagaço são vendidas para diversos usos, como alimentação para gado em época de estiagem. Quando o valor da eletricidade supera 200 reais é mais vantajoso vender eletricidade, porém, é necessário fazer uma análise prévia para verificar qual opção possui o melhor retorno financeiro. O vapor originado pela combustão do bagaço movimenta as turbinas gerando um total de 15.656 kW de energia elétrica. Embora o bagaço tenha elevado potencial energético, verificou-se que as usinas não aproveitam a potência máxima contida no bagaço. Eficiência essa que poderia ser alcançada com investimento em novas tecnologias. Além do benefício econômico, a utilização da biomassa tem como consequência a minimização dos gases de efeito estufa, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Enfim, o bagaço da cana-de-açúcar é uma fonte renovável promissora, porém, é necessário sanar os entraves identificados ao longo da sua cadeia de valorização para maior participação do bagaço na matriz energética brasileira.

**Palavras-chave:** Resíduo da usina de álcool. Bioenergia. Biomassa.

## ABSTRACT

In the quest for sustainability renewable energies emerge as an option to replace conventional sources. Alternative sources cause less adverse environmental impact compared with traditional (oil, natural gas and coal). Within the context of renewable energy, this paper aims to analyze the energy use of bagasse from cane sugar in northeastern Brazil. State of the art has been identified within the research field of research and raised the strengths and weaknesses along the value chain of bagasse. In this dissertation is presented as a case study a alcohol plant in the state of Paraíba. The distillery produces 60 tons of bagasse per hour, which uses 48 tons per hour to feed the boiler, the remaining 12 tons per hours of bagasse are sold for various uses as feed for cattle in the dry season. When the value of electricity exceeds 200 reais is more profitable to sell electricity, however, is necessary to make a preliminary analysis to determine which option has the best financial return. The steam caused by the combustion of bagasse moves the turbines generating a total of 15.656 kW of electricity. Although bagasse has high energy potential, it was found that the sugar plants not enjoy the full power contained in the bagasse. Efficiency that could be achieved with investment in new technologies. In addition to the economic benefit, the use of the biomass results in the minimization of greenhouse gases, contributing to sustainable development. Anyway, bagasse from cane sugar is a promising renewable source, however, you must address the barriers identified throughout its value chain for greater participation of bagasse in the Brazilian energy matrix.

**Keywords:** Power plant of alcool. Bioenergy. Biomass.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Matriz elétrica brasileira, ano de 2013 .....                                                                               | 19 |
| Figura 2 – Matriz energética brasileira, ano de 2013 .....                                                                             | 20 |
| Figura 3 – Consumo final de energia no Brasil, por fonte. ....                                                                         | 20 |
| Figura 4 – Consumo de energia do setor energético no Brasil .....                                                                      | 21 |
| Figura 5 – Processos de conversão da biomassa em energéticos. ....                                                                     | 25 |
| Figura 6 – Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa. ....                                                                | 26 |
| Figura 7 – Principais tecnologias de combustão para biomassa. ....                                                                     | 31 |
| Figura 8 – Ilustração em multi-escala da cadeia de valorização dos biocombustíveis .....                                               | 35 |
| Figura 9 – Faturamento bruto do sistema agroindústria da cana-de-açúcar, safra 2013/2014 .....                                         | 37 |
| Figura 10 – Condição hídrica geral para o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil .....                                                    | 40 |
| Figura 11 – Mapa de localização da usina Japungú S/A .....                                                                             | 46 |
| Figura 12 – Usinas localizadas no nordeste do Brasil que utilizam a cogeração em 2015 .....                                            | 66 |
| Figura 13 – Quantitativo das usinas no nordeste brasileiro com potência fiscalizada em 2015.....                                       | 67 |
| Figura 14 – Estrada de acesso a Usina Japungú .....                                                                                    | 68 |
| Figura 15 – Gaiola carregada de cana-de-açúcar na estrada de acesso à Usina Japungú .....                                              | 68 |
| Figura 16 – Baú carregado de cana-de-açúcar .....                                                                                      | 69 |
| Figura 17 – Gaiola na balança para a pesagem .....                                                                                     | 69 |
| Figura 18 – Sonda de amostragem .....                                                                                                  | 70 |
| Figura 19 – Forrageira (l) e laboratório (m) .....                                                                                     | 70 |
| Figura 20 – Transporte da cana-de-açúcar (n) para a lavagem (o) .....                                                                  | 71 |
| Figura 21 – Vista da recepção da cana-de-açúcar .....                                                                                  | 71 |
| Figura 22 – mesa alimentadora (r) e esteira de metálica (s) .....                                                                      | 72 |
| Figura 23 – Ternos de moenda (t) e esteiras intermediárias (u) .....                                                                   | 72 |
| Figura 24 – Quarta esteira intermediária com bagaço (v) e tapete (w) .....                                                             | 73 |
| Figura 25 – Vista frontal da caldeira (x) e vista da chaminé da caldeira (y) .....                                                     | 73 |
| Figura 26 – Fluxograma de vapor da usina Japungú .....                                                                                 | 75 |
| Figura 27 – Turbogenerador de condensação da usina Japungú .....                                                                       | 76 |
| Figura 28 – Fluxograma dos insumos e resíduos da caldeira da usina Japungú .....                                                       | 81 |
| Figura 29 – Fluxograma da geração e distribuição de energia elétrica pela combustão do bagaço da cana-de-açúcar da usina Japungú ..... | 83 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Valores máximos permitidos de emissão de MO e NO <sub>x</sub> (monóxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio) .....                        | 42 |
| Tabela 2 – Valores máximos permitidos de emissão de Material Particulado (MP) e NO <sub>x</sub> (monóxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio) ..... | 42 |
| Tabela 3 – Valores máximos permitidos de emissão de monóxido de carbono (CO) .....                                                                     | 43 |
| Tabela 4 – Análise imediata da biomassa .....                                                                                                          | 47 |
| Tabela 5 – Análise elementar da biomassa .....                                                                                                         | 47 |
| Tabela 6 – Consumo estequiométrico de oxigênio por elemento químico .....                                                                              | 50 |
| Tabela 7 – Massa molar das espécies químicas .....                                                                                                     | 50 |
| Tabela 8 – Empreendimentos em operação geradores de energia no Brasil .....                                                                            | 56 |
| Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível localizadas na região nordeste do Brasil (2014) .....                       | 58 |
| Tabela 10 – Quantidade (kmol) de gases úmidos produzidos por quilograma de combustível .....                                                           | 79 |
| Tabela 11 – Percentagem de gases produzidos durante a combustão por quilograma de combustível .....                                                    | 80 |
| Tabela 12 – Energia gerada, distribuída e vendida da usina Japungú, com antigo e novo gerador .....                                                    | 84 |

## **LISTA DE SIGLAS**

AFCAL – Associação dos Fabricantes de Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos  
ANNEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
APE – Autoprodução de Energia  
ATR – Açúcar Total Recuperável  
BNDES – Bando Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social  
CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica  
Conab – Companhia Nacional de Abastecimento  
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente  
CONPET – Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás  
ELETROBRAS – União das centrais elétricas brasileiras  
EPA – Environmental Protection Agency United States  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
GESis – Planejamento e Gestão Estratégica de Sistemas Agroindustriais  
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.  
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento  
MIC – Ministério da Indústria e Comércio  
MME – Ministérios de Minas e Energia  
OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento  
PIB – Produto Interno Bruto  
PIE – Produção Independente de Energia  
PNCEE – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
PNCURE – Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia  
Proinfa – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica  
PRONAR – Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar  
REG – Registro de Energia  
SAG – Sistema Agroindustrial  
SE4All – Sustainable Energy for All  
SUDEMA – Superintendência de Administração do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos da Paraíba  
UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change  
BEP – Barril Equivalente de Petróleo

## SUMÁRIO

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                       | <b>14</b> |
| <b>1.1 Objetivos .....</b>                                                                      | <b>16</b> |
| <i>1.1.1 Objetivo geral .....</i>                                                               | <i>16</i> |
| <i>1.1.2 Objetivo específico .....</i>                                                          | <i>16</i> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                            | <b>17</b> |
| <b>2.1 Marcos regulatórios no processo de construção da eficiência energética no Brasil ...</b> | <b>17</b> |
| <b>2.2 Matriz elétrica e energética brasileira .....</b>                                        | <b>18</b> |
| <b>2.3 Biomassa .....</b>                                                                       | <b>22</b> |
| <i>2.3.1 Definição e fontes da biomassa .....</i>                                               | <i>23</i> |
| <i>2.3.2 Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa .....</i>                       | <i>25</i> |
| <i>2.3.3 Processos de conversão termoquímica .....</i>                                          | <i>27</i> |
| <i>2.3.3.1 Combustão .....</i>                                                                  | <i>27</i> |
| <i>2.3.3.2 Gasificação .....</i>                                                                | <i>28</i> |
| <i>2.3.3.3 Pirólise .....</i>                                                                   | <i>28</i> |
| <i>2.3.3.4 Liquefação .....</i>                                                                 | <i>29</i> |
| <i>2.3.4 Processos de conversão bioquímica .....</i>                                            | <i>29</i> |
| <i>2.3.5 Processos de conversão físico-química .....</i>                                        | <i>29</i> |
| <b>2.4 Classificação das fornalhas para cogeração .....</b>                                     | <b>30</b> |
| <b>2.5 Valorização energética do bagaço da cana-de-açúcar no Brasil .....</b>                   | <b>33</b> |
| <b>2.6 Uso da biomassa no setor sucroalcooleiro .....</b>                                       | <b>34</b> |
| <i>2.6.1 Potencial do setor sucroalcooleiro .....</i>                                           | <i>36</i> |
| <i>2.6.2 Crise do setor sucroalcooleiro .....</i>                                               | <i>38</i> |
| <i>2.6.3 Safra 2014/2015 .....</i>                                                              | <i>39</i> |
| <b>2.7 Legislação ambiental .....</b>                                                           | <b>41</b> |
| <b>3 METODOLOGIA .....</b>                                                                      | <b>44</b> |
| <b>3.1 Cálculos do balanço mássico .....</b>                                                    | <b>47</b> |
| <i>3.1.1 Quantidade de ar atmosférico necessária para combustão do bagaço .....</i>             | <i>48</i> |
| <i>3.1.2 Vazão da biomassa necessária para combustão completa da biomassa .....</i>             | <i>48</i> |
| <i>3.1.3 Quantidade de ar necessária para combustão completa da biomassa .....</i>              | <i>49</i> |
| <i>3.1.4 Produtos gerados na combustão .....</i>                                                | <i>51</i> |
| <i>3.1.4.1 Produtos sólidos da combustão .....</i>                                              | <i>51</i> |
| <i>3.1.4.2 Produtos gasosos da combustão .....</i>                                              | <i>52</i> |

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                      | <b>56</b> |
| <b>4.1 Usina de cana-de-açúcar do Brasil .....</b>                         | <b>56</b> |
| <b>4.2 Estudo de caso: Japungú Agroindustrial S/A .....</b>                | <b>67</b> |
| <b>4.3 Cálculos do balanço mássico da usina Japungú .....</b>              | <b>77</b> |
| <i>4.3.1 Ar necessário para combustão do bagaço na Usina Japungú .....</i> | <i>77</i> |
| <i>4.3.2 Produtos da combustão na fase sólida .....</i>                    | <i>78</i> |
| <i>4.3.3 Produtos da combustão na fase gasosa .....</i>                    | <i>79</i> |
| <b>4.4 Cogeração de energia da Usina Japungú .....</b>                     | <b>82</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO .....</b>                                                   | <b>86</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                   | <b>87</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

As questões ambientais estão cada vez mais presentes na mídia, escolas e universidades. A população informada torna-se consciente da importância de conservar e preservar o meio ambiente, pois percebe que os impactos ambientais negativos consequentes da má gestão dos recursos naturais afeta diretamente suas vidas. Com a tomada de consciência surge um novo tipo de ator social, o ambientalmente correto.

A empresa Tetra pak, trabalha com o processamento de alimentos e soluções de embalagens a nível mundial, realizou pesquisa em 13 países, com participação de mais de sete mil consumidores, apontou que esses consumidores estão mais conscientes. A maioria dos consumidores entrevistados consideram a preservação do meio ambiente como um indicador de qualidade de vida (Tetra Pak, 2013). Motivado pelo novo mercado consumidor vários setores da economia incluíram nas suas pautas a busca pela sustentabilidade.

A energia está no centro do desafio da sustentabilidade, pois, seu uso está ligado às questões ambientais, econômicas e socioculturais. O conceito mais disseminado de energia é encontrado nos livros de física que afirma que “energia é a medida da capacidade de efetuar trabalho” (GRINOMI et. al. 2004), porém nesse estudo a energia será abordada sob a perspectiva ambiental, não se detendo apenas aos conceitos físicos, mas através de uma visão holística pretende-se perceber a relevância da energia para atualidade e os impactos de seu uso.

A energia se apresenta de várias formas na natureza (química, elétrica, térmica, mecânica) e pode ser transferida de uma forma para outra, por meio de conversão (GRINOMI et. al. 2004). O setor energético de cada país é o responsável por gerir essa conversão segundo sua necessidade, visando sempre à sustentabilidade.

Os recursos naturais mais utilizados atualmente para gerar energia são os chamados convencionais: petróleo, gás natural e carvão mineral. Os recursos convencionais são limitados, pois o período necessário para se renovarem é extremamente longo.

O mundo vive hoje uma problemática, de um lado há uma população que possui um estilo de vida onde é inviável viver sem energia e do outro lado os recursos energéticos mais utilizados são limitados. Para resolver esse conflito é necessário pensar em novas fontes de energia renováveis que venham a diversificar a matriz energética.

Fontes de energia renováveis surgem como alternativa para substituir as tradicionais, além de ilimitada, as fontes não convencionais de energia tendem a provocar menor impacto ambiental negativo quando comparada às convencionais.

Dentre as fontes de energia não convencionais tem-se a energia eólica e termossolar, já estão mais consolidadas, a energia fotovoltaica que ainda não se apresenta viável economicamente e a biomassa.

Segundo Preto e Mortoza (2010) embora já existam iniciativas de aproveitamento da biomassa, que comprovam sua viabilidade para geração de eletricidade, ainda há muito para ser feito para estimar, contabilizar e analisar o potencial brasileiro.

Na dimensão industrial o uso da energia é indispensável, porém oneroso, o que impulsiona as empresas a buscarem formas mais eficientes para utilizar esse recurso. Para melhor compreensão, tomemos como exemplo o estudo de caso da presente pesquisa, localizada no estado da Paraíba. A destilaria necessita de aproximadamente 6500 kW de energia elétrica para a indústria e 7000 kW para a irrigação dos canaviais.

O grupo Energisa, responsável por controlar a distribuição de energia elétrica do estado da Paraíba, cobra 0,36787 centavos para o uso industrial e 0,06655 para irrigação rural (ENERGISA, 2015). Portanto, se a destilaria fosse dependente da concessionária gastaria 2.857,005 reais por hora. Uma alternativa para diminuir esse gasto é utilizar o bagaço da cana, resíduo do processo produtivo, em substituição à energia paga às concessionárias.

Além do benefício econômico, pela reinserção do resíduo na cadeia produtiva, há também o benefício ambiental, pois, segundo a política nacional de resíduos sólidos, lei 12.305 de 2010, é responsabilidade do gerador dar um destino final ambiente correto ao resíduo gerado.

Devido à viabilidade econômica e ambiental, o bagaço torna-se cada vez mais valorizado no setor sucroalcooleiro. Entretanto, a participação dos derivados da cana na matriz energética brasileira ainda é tímida, apenas 16%.

Este trabalho irá analisar a valorização da biomassa identificando as potencialidades e fragilidades da utilização dessa fonte de energia, através do estudo do setor energético brasileiro e setor sucroalcooleiro, utilizando uma destilaria real como estudo de caso para calcular os fluxos de balanço mássico visando identificar as entradas e saídas do sistema, bem como o potencial energético.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

O objetivo principal deste trabalho consiste em analisar a valorização energética do bagaço da cana-de-açúcar na região nordeste do Brasil, tendo como estudo de caso uma usina sucroalcooleira localizada no estado da Paraíba.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

- Identificar o potencial do uso do bagaço para cogeração de energia.
- Identificar a valorização energética do bagaço da cana-de-açúcar, sob a perspectiva da matriz energética brasileira.
- Identificar as instalações em operação movidas à biomassa, que utilizam como combustível o bagaço da cana-de-açúcar, dentro do campo de investigação estabelecido, a saber: a região Nordeste do Brasil.
- Realizar o balanço mássico da caldeira da usina estudo de caso.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Marcos regulatórios no processo de construção da eficiência energética no Brasil**

Por longos anos perpetuou-se o pensamento que é necessário o desenvolvimento a qualquer custo. Esse pensamento faz com que medidas de eficiência energética não seja prioridade em países em desenvolvimento que tem como objetivo aumentar o consumo de energia e não reduzi-lo.

Entretanto, é importante salientar que após a crise do petróleo da década de 1970, os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento (OCDE) adotaram uma política diferenciada, começando a investir em medidas de eficiência energética (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Goldemberg e Lucon (2007) ressaltam que embora o Brasil seja um país em desenvolvimento nada impede que o uso de tecnologias modernas e eficientes seja introduzidas, acelerando com isso o uso de tecnologias eficientes.

Em 1985 o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério da Indústria e Comércio (MIC) criaram o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PNCEE), transformado em Programa de Governo em 1991, cuja missão consiste em “promover a eficiência energética, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população e eficiência dos bens e serviços, reduzindo os impactos ambientais” (ELETROBRAS, 2014).

Em 1991 foi criado o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás (CONPET), programa do Governo Federal, que possui como objetivo promover o desenvolvimento de uma cultura antidesperdício no uso dos recursos naturais não renováveis no Brasil (CONPET, 2014).

Em 2001 foi criada a Lei nº 10.295 que instituiu a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (PNCURE) visando à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente. Esta Lei alerta os fabricantes e os importadores de máquinas e aparelhos consumidores de energia a observar e obedecer aos níveis máximos de consumo de energia e mínimos de eficiência energética (BRASIL, 2001).

Fomentando a cultura antidesperdício a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, obrigou as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica a destinar, anualmente, 0,75% de sua receita operacional líquida em pesquisa e

desenvolvimento do setor elétrico e, 0,25% em programas de eficiência energética no uso final (BRASIL, 2000).

Em 2002, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), através da lei N° 10.438, de 26 de abril de 2002, com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica, com base em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa, no Sistema Elétrico Interligado Nacional (BRASIL, 2002).

A matriz eletroenergética do Brasil possui hoje destaque internacional, o país lidera a produção mundial de energias renováveis. Diante dessa realidade, o Brasil foi convidado para participar da sessão “Renewable Energy – the Brazilian Expertise” no Fórum anual Sustainable Energy for All (SE4All) das Nações Unidas, que aconteceu em junho de 2014 e contou com a presença de chefes de Estado (CEPEL, 2014).

O evento estabeleceu diálogos sobre energia e objetivos pós-2015, além de traçar novas metas em torno dos três grandes objetivos da iniciativa a serem cumpridos até 2030, a saber: proporcionar acesso universal à energia, dobrar a parcela de energia renovável na matriz energética mundial e duplicar a taxa mundial de melhoria da eficiência energética.

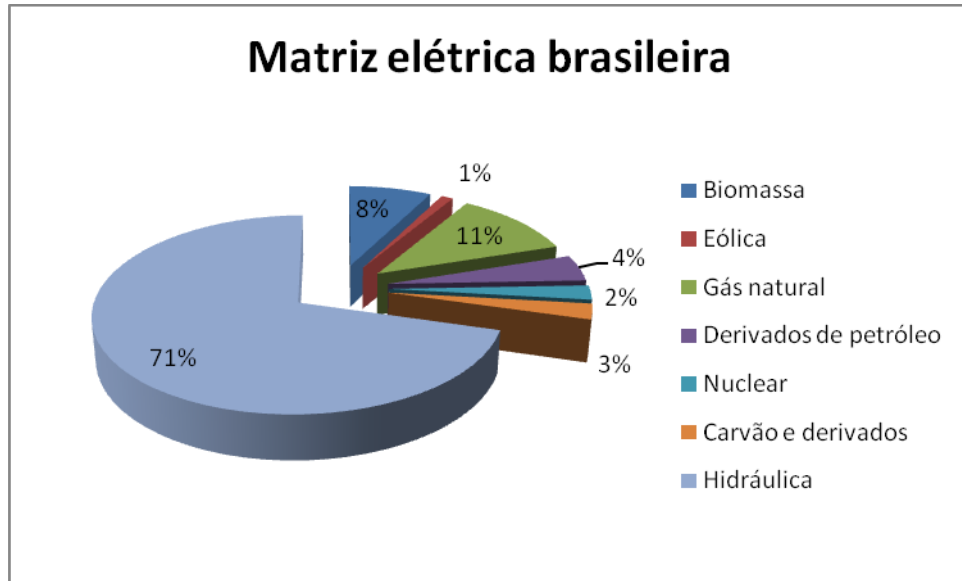
Corroborando com estas diretrizes a União das Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras), tem como visão ser em 2020 o maior sistema empresarial global de energia limpa (ELETROBRAS, 2014). Uma opção para alcançar esse objetivo é investir na inserção de biomassa na matriz energética brasileira.

## **2.2 Matriz elétrica e energética brasileira**

Para evitar possíveis equívocos, é importante ressaltar a diferença entre os termos matriz elétrica e matriz energética. A matriz elétrica é composta pelas fontes de geração de energia elétrica utilizadas. Já a matriz energética é a soma de todas as formas de energia produzidas pela sociedade, incluindo a energia elétrica, mas também combustíveis para transporte, uso residencial e industrial, entre outros (MULTRIO, 2007).

Considerando a geração de energia elétrica, na Figura 1 pode-se observar a matriz elétrica brasileira, que apresenta a oferta interna por tipo de fonte.

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira, ano de 2013.



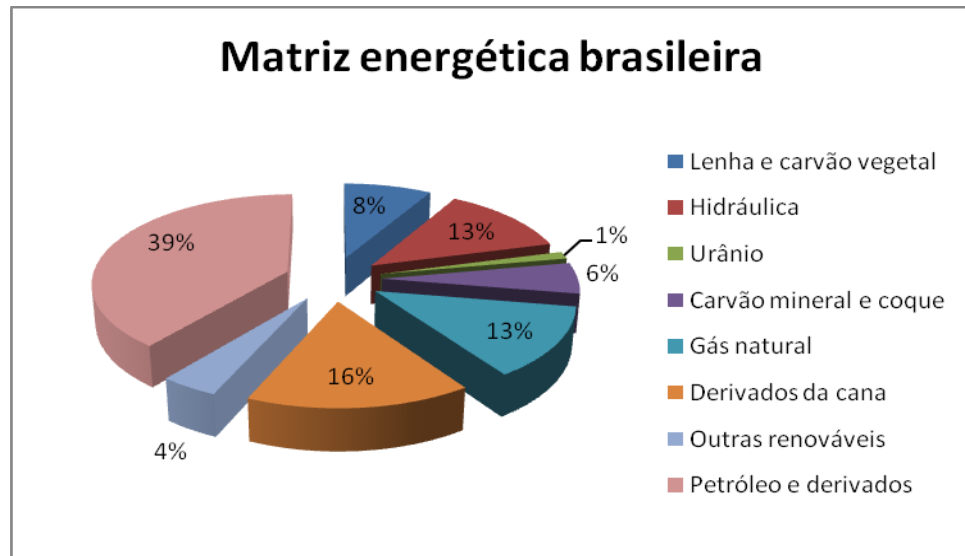
Fonte: adaptado de EPE (2014).

A hidrelétrica, que inclui a importação de eletricidade, se destaca, porém, a dependência desta provoca instabilidade, pois esta condicionada às variações climáticas, como em épocas de estiagem. Desta forma a diversificação da matriz se coloca como uma melhor opção.

A matriz elétrica brasileira em 2013 contou com 79,3% de renováveis, número inferior a 2012 quando a participação destas foi de 84,5%. O decréscimo observado pode ser explicado pela menor oferta de hidroeletricidade, devido às condições hidrológicas desfavoráveis, aumento da geração térmica, seja gás natural, carvão mineral ou óleo (EPE, 2014).

Conforme Figura 2, a matriz energética brasileira quanto as fonte renováveis se compõe por lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados da cana, dentre outras. Quanto às fontes não renováveis destacam-se urânio, carvão mineral e coque, gás natural , petróleo e derivados.

Figura 2 – Matriz energética brasileira, ano de 2013.

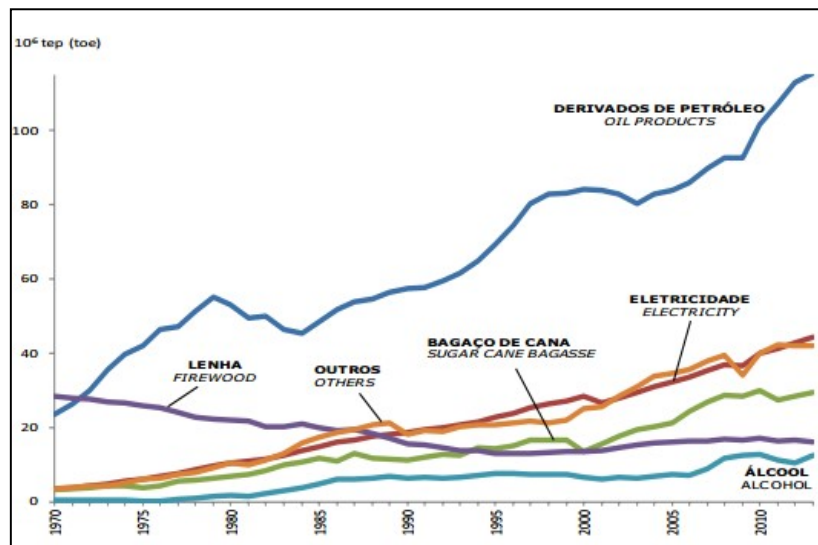


Fonte: adaptado de EPE (2014).

Considerando todas as formas de energia, segundo dados do balanço energético nacional, referente ao ano de 2013, a matriz energética brasileira (Figura 2) era composta por 41% de renováveis e 59% de não renováveis. Embora a participação das fontes renováveis não fossem a maioria, o Brasil é considerado o país com maior utilização de energia renovável em sua matriz (EPE, 2015).

Na Figura 3 pode-se observar as fontes utilizadas de energia no Brasil: derivados de petróleo, lenha, bagaço de cana, eletricidade, álcool e outros. Para o ano de 2013 a principal fonte de energia foi oriunda de derivados do petróleo.

Figura 3 – Consumo final de energia no Brasil, por fonte.

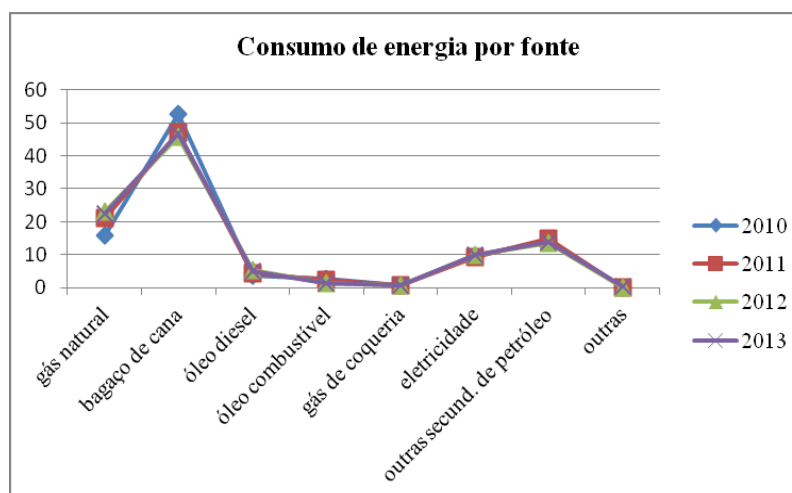


Fonte: EPE (2014).

Na Figura 3, pode-se observar o elevado consumo dos derivados de petróleo, comparado às demais fontes. O consumo final de energia utilizando a lenha tem diminuído ao longo dos anos e o uso do bagaço da cana-de-açúcar como recurso energético tem aumentado. A eletricidade cresce continuamente. O álcool tem apresentado pequenas oscilações entre 2005 e 2013.

Diversos setores da economia consomem a energia ofertada no Brasil, a Figura 4 mostra o consumo de energia por fonte do setor energético. Pode-se notar a supremacia do bagaço da cana-de-açúcar o que se deve em grande parte à queima do bagaço tanto para o consumo das usinas quanto para a rede pública.

Figura 4 – Consumo de energia do setor energético do Brasil.



Fonte: adaptado de EPE (2014).

A Figura 4 mostra que a matriz energética brasileira é diversificada, sendo necessário incentivar a produção de energia renovável, com cuidados ambientais em toda a cadeia, para que as fontes poluidoras sejam substituídas.

Segundo MAPA (2012) o Brasil é responsável por 61,8% do açúcar de cana exportado no mundo. A taxa média de aumento da produção do Brasil deveria crescer 3,25%, até 2018/19, ou seja, o país deveria colher 47,34 milhões de toneladas do produto, o que corresponde a um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas em relação ao período 2007/2008. Para as exportações, o volume previsto para 2019 é de 32,6 milhões de toneladas (MAPA, 2012).

Quanto aos produtos obtidos a partir da cana esmagada temos a produção de açúcar e álcool que podem ser considerados primários ou secundários. Os produtos primários

são o caldo da cana, melaço, bagaço, pontas, folhas e olhaduras. Quanto aos produtos secundários tem-se o álcool anidro e o álcool hidratado (EPE, 2013).

## **2.3 Biomassa**

A biomassa é considerada o combustível mais antigo já conhecido, e ainda hoje amplamente utilizado, principalmente em países em desenvolvimento (MCKENDRY, 2002a), onde é responsável por cerca de 35% do consumo de energia primária. Na Europa e América do Norte esse percentual cai para 3% (FARRELL; GOPAL, 2008).

A utilização de biomassa no Brasil é resultado de uma combinação de fatores, incluindo a disponibilidade de recursos e mão de obra barata (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

As necessidades energéticas do Brasil supridas pela biomassa estão sob a forma de lenha para queima direta nas padarias e cerâmicas, carvão vegetal como combustível alternativo nas fábricas de cimento do norte e do nordeste, carvão mineral, álcool etílico ou álcool metílico para fins carburantes e para indústria química do sul, o bagaço de cana e outros resíduos combustíveis são utilizados para geração de vapor para produzir eletricidade (GRAUER; KAWANO, 2008).

Visando reduzir gastos financeiros o setor energético brasileiro tem uma política tradicional baseada na autossuficiência, entretanto o investimento em petróleo consome boa parte da renda disponível no país. O Brasil depende e dependerá por muito tempo de petróleo e de gás e precisa buscar alternativas que reduzam seu consumo (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Combustíveis a base de biomassa apresentam algumas vantagens e desvantagens quando comparados com os combustíveis à base de petróleo. Dentre as vantagens pode-se citar o baixo custo de aquisição, as cinzas são menos agressivas ao meio ambiente, menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos), menor risco ambiental e as emissões não contribuem para o efeito estufa (GRAUER; KAWANO, 2008).

Como desvantagens do uso da biomassa comparada com os combustíveis fósseis tem-se principalmente um menor poder calorífico e uma maior possibilidade de geração de material particulado para a atmosfera. Isto significa maior custo de investimento para a caldeira e em equipamentos para remoção de material particulado e dificuldades no estoque e armazenamento (GRAUER; KAWANO, 2008).

### 2.3.1 Definição e fontes da biomassa

A biomassa consiste em todo o material orgânico originado a partir de plantas, como algas, árvores e material de colheitas. É produzida pelas plantas verdes que convertem a luz solar em material vegetal através da fotossíntese (MCKENDRY, 2002a).

A biomassa pode ser considerada como a matéria orgânica que armazena energia da luz solar em ligações químicas. Quando submetida à digestão ou combustão as ligações entre carbono adjacente, hidrogênio e moléculas de oxigênio são quebradas liberando a energia química armazenada (MCKENDRY, 2002a).

No setor da agricultura pode-se destacar algumas culturas que possuem potencial energético, como as culturas lenhosas, cultivos de amido e açúcar e oleaginosas. As características da cultura ideal para produção de energia são: alto rendimento (produção máxima de matéria seca por hectare), baixa necessidade de energia para produção, baixo custo, composição com menos contaminantes (MCKENDRY, 2002a).

O clima e tipo de solo local são fatores de forte influencia na escolha do tratamento que será aplicado na biomassa para o eficiente aproveitamento energético. Regiões com clima quente e seco não necessitam submeter a mesma a secagem mesmo que a biomassa apresente umidade elevada, pois devido ao clima o processo de secagem ocorre naturalmente. Entretanto, dependendo da biomassa a ser utilizada poderá ser viável tecnologias de pré-tratamento como o enfardamento e a peletização.

O enfardamento, compactação da biomassa, auxilia na diminuição de custos com transporte e armazenamento, sendo útil para os casos em que a biomassa se encontra em locais diferentes de onde será realizada a transformação energética.

A peletização diminui a umidade da biomassa, aumenta a densidade energética e facilita o transporte e armazenamento. Na Europa o setor de pellets é movido tanto para o uso industrial para gerar energia elétrica ou vapor para o processo, quanto para o uso doméstico no aquecimento das residências.

Em todos os casos o pré-tratamento permite elevar a densidade energética da biomassa, resultando em um combustível mais eficiente, porém deve-se estudar cada caso para avaliar a viabilidade do pré-tratamento e melhor opção a utilizar.

Na Europa, onde os resíduos florestais são abundantes, o pré-tratamento é fundamental para garantir o aproveitamento energético eficiente devido ao clima europeu e às características da biomassa.

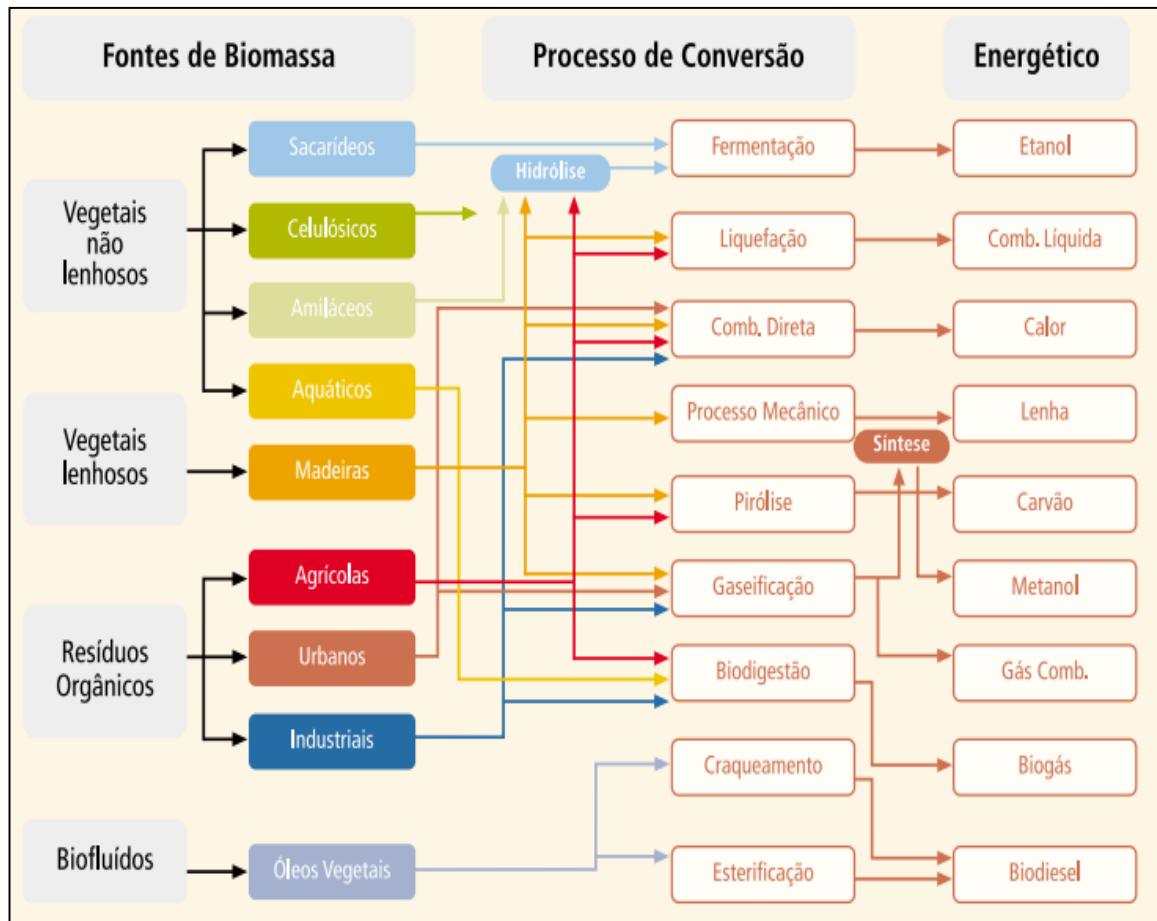
Nas áreas úmidas é necessário passar por um processo prévio de secagem forçada visando maior eficiência na queima. Já nas regiões de clima quente o processo é inverso, sendo necessário que a biomassa seja molhada antes do processo de conversão energética. É necessário estudo aprofundado para afirmar a necessidade ou não da realização de pré-tratamento em cada caso.

Tendo em vista que o bagaço da cana-de-açúcar é um resíduo do processo produtivo, a geração ocorre no mesmo sítio onde é realizado o aproveitamento energético não apresentando custo significativo com transporte e armazenamento. Quanto à umidade, de fato o bagaço apresenta umidade elevada, o que diminui seu potencial calorífico, sob essa perspectiva a utilização de um pré-tratamento poderia contribuir na eficiência do processo, porém o clima quente do nordeste proporciona um pré-tratamento natural.

Quanto à origem, a biomassa pode ser obtida de vegetais lenhosos (madeira), vegetais não lenhosos (sacarídeos, celulósicos, amiláceos, aquáticos), resíduos orgânicos (agrícolas, urbanos e industriais) e biofluidos (óleos vegetais) (CORTEZ; LORA; AYARZA, 2009).

O potencial energético da biomassa vai depender da sua origem e tecnologia de conversão, portanto é necessário saber qual tipo de combustível se deseja obter para escolher a biomassa e processo que mais se adequa com o energético. As rotas tecnológicas de conversão da biomassa em energético são variadas, conforme pode-se observar na Figura 5.

Figura 5 – Processos de conversão da biomassa em energéticos.



Fonte: ANNEL (2002).

### 2.3.2 Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa

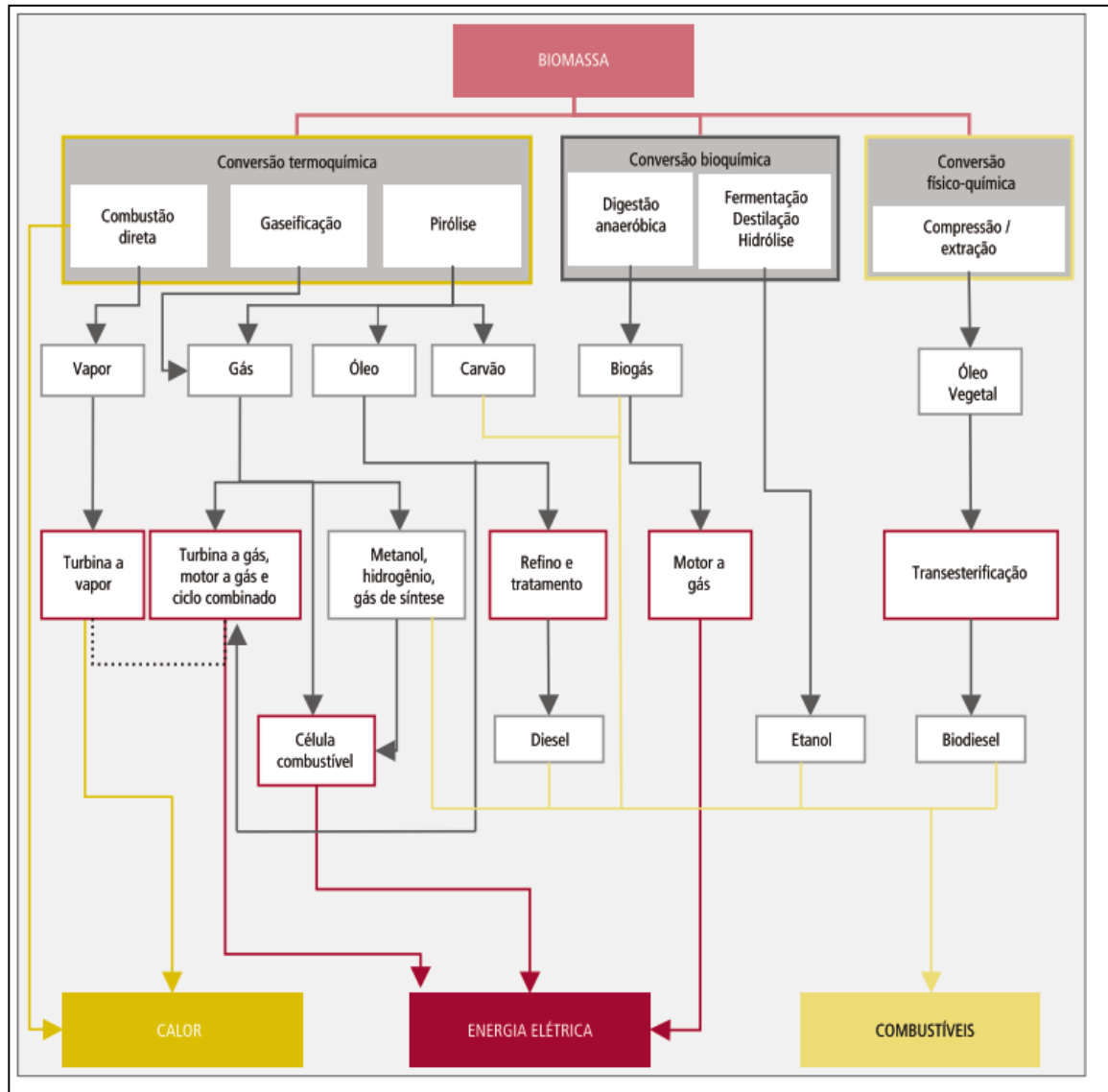
As discussões sobre bioenergia, como alternativa à energia fóssil, aumentaram nos últimos anos por causa do aquecimento global acelerado. Diferente dos combustíveis fósseis, a combustão dos biocombustíveis não contribui para o efeito estufa, pois graças à renovação da biomassa, os  $\text{CO}_2$  emitidos são considerados neutros (VASSILEV; BAXTER; VASSILEVA, 2013).

Existem variados processos de conversão de biomassa em energia. Alguns fatores podem influenciar a escolha do processo de conversão, como o tipo e quantidade de biomassa disponível, o uso final requerido, legislação ambiental e viabilidade econômica (MCKENDRY, 2002b).

Segundo McKendry (2002b) a conversão de biomassa em energia é realizada utilizando-se duas principais tecnologias de processo: termoquímica e bioquímica.

Os processos termoquímicos englobam a combustão, pirólise, gasificação e liquefação. A conversão bioquímica possui como opção de processo de conversão a digestão anaeróbia e a fermentação (MCKENDRY, 2002b). A Figura 6 lista as rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa, que serão descritas a seguir.

Figura 6 – Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa.



Fonte: adaptado de LARKIN et al. (2004) apud Brasil (2007).

### **2.3.3 Processos de conversão termoquímica**

#### **4.3.3.1 Combustão**

A combustão é o processo mais utilizado na conversão de biomassa no mundo contribuindo para mais de 97% da produção mundial de bioenergia. Em alguns países a utilização da biomassa para uso doméstico faz parte do cotidiano das pessoas, como por exemplo para cozinhar os alimentos e aquecer as residências (CHAMPAGNE; ZHANG; XU, 2010).

Quanto ao uso industrial para geração elétrica, o processo de combustão transforma a energia química presente na biomassa primeiramente em energia calorífica, posteriormente em energia mecânica e por último em energia elétrica. O vapor utilizado para geração de energia elétrica pode retornar para a caldeira ou ser utilizado para alimentar o processo industrial.

Os equipamentos básicos usados durante o processo de conversão de energia são as fornalhas onde se realiza a combustão e os turbogeradores onde a energia na forma de vapor é transformada em energia mecânica e elétrica.

Com a preocupação com a sustentabilidade e consequente busca por energias renováveis o bagaço está passando por um processo de valorização.

A valorização energética do bagaço da cana-de-açúcar consiste na sua combustão, onde a energia calorífica resultante é transformada em energia elétrica. Essa alternativa de destino final dos resíduos é muito utilizada no norte da Europa. As principais vantagens da valorização energética são o aproveitamento da energia resultante da queima de resíduos e a redução do peso e do volume desses mesmos resíduos que serão enviados ao aterro sanitário (AFCAL, 2010).

Embora qualquer tipo de biomassa possa ser queimada, processos de combustão só são viáveis quando a biomassa apresenta até 50% de umidade. Caso a umidade seja superior a 50% é melhor optar por um processo de conversão biológica, visando assegurar a eficiência (MCKENDRY, 2002b).

A concentração de monóxido de carbono se constitui em um indicador da eficiência de combustão, ou seja, o CO é critério para a indicação de instabilidades e não uniformidades no processo de combustão (EPA, 1996).

Emissões de monóxido de carbono (CO) resultam dos processos onde o carbono presente na biomassa não é totalmente oxidado em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Altos níveis de

monóxido de carbono indicam baixa eficiência no processo. A perda de eficiência pode estar relacionada com a temperatura baixa da combustão, baixo nível de oxigênio ou curto tempo de reação (EPA, 1996).

Outro produto da combustão são os óxidos de nitrogênio. O óxido nítrico (NO) é o componente primário do  $\text{NO}_x$ , no entanto o dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) também são formados em quantidades menores. A combinação dos compostos é referida como  $\text{NO}_x$  (EPA, 1996).

#### 2.3.3.2 Gasificação

Segundo McKendry (2002b) e Zhanga, Champagne e Xu (2010), o processo de gaseificação consiste na conversão de biomassa em uma mistura de gás combustível através da presença parcial de oxigênio e valores específicos de aquecimento.

Quando se utiliza como agente de gasificação ar ou oxigênio, o processo de gasificação é semelhante a um processo de combustão parcial. A gasificação também pode ser vista como uma forma especial de pirólise, necessitando temperaturas mais elevadas para atingir rendimentos mais elevados. A pirólise é o primeiro estágio de gasificação da biomassa (CHAMPAGNE; XU; ZHANGA, 2010).

#### 2.3.3.3 Pirólise

A pirólise é a conversão de biomassa em frações líquidas, sólidas e gasosas, pelo aquecimento da biomassa na ausência de ar (MCKENDRY, 2002b). Os produtos gerados durante o processo de pirólise são carvão (sólido), bio-óleo (líquido) e gases (CHAMPAGNE; XU; ZHANGA, 2010).

O bio-óleo, produto principal da pirólise, pode ser usado em motores e turbinas, além do possível uso como matéria-prima para as refinarias. Entretanto, alguns problemas ainda precisam ser superados no processo de conversão e na utilização do bio-óleo, como a baixa estabilidade térmica e sua corrosividade (MCKENDRY, 2002b).

Dentre os processos de conversão que produzem bio-óleo há também a hydrothermal upgrating (HTU) e a liquefação. Na HTU a conversão da biomassa é realizada em um ambiente úmido a alta pressão (MCKENDRY, 2002b), onde a biomassa permanece durante 5 a 20 minutos com água sob condições subcríticas (300-350°C, 10-18MPa) para se

obter um líquido orgânico pesado, com um poder calorífico de 30-35 MJ/kg (PETERS et al., 2004).

#### *2.3.3.4 Liquefação*

A liquefação pode ser definida como a conversão termoquímica em fase líquida a temperaturas baixas (523-623K) e altas pressões (100-200 bar), normalmente com uma pressão parcial elevada de hidrogênio e um catalisador para aumentar a velocidade de reação (LOO; KOPPEJAN, 2008).

Em comparação com a pirólise, a liquefação tem um rendimento mais elevado (LOO; KOPPEJAN, 2008). Entretanto, o interesse no processo de liquefação é baixo devido aos reatores e ao sistema de alimentação do combustível serem mais complexos e caros que os do processo de pirólise (MCKENDRY, 2002b).

#### *2.3.4 Processos de conversão bioquímica*

Quanto aos processos de conversão energética bioquímicas tem-se a fermentação e a digestão anaeróbia. A fermentação já é usada comercialmente em larga escala, em vários países para a produção de etanol a partir de cultura de açúcar e plantações de amido (MCKENDRY, 2002b).

Na digestão anaeróbia as bactérias convertem a matéria orgânica diretamente em biogás, um mistura de gás composto principalmente por metano e dióxido de carbono, com pequenas quantidades de outros gases, tais como sulfureto de hidrogênio (EU, 1999).

#### *2.3.5 Processos de conversão físico-química*

O processo de conversão físico-química consiste na obtenção de óleos vegetais, produzidos a partir de culturas oleaginosas (por exemplo o girassol), através de pré-prensagem e técnicas de extração e posteriormente transformação química (VERINGA, 2000).

Os óleos vegetais podem ser convertidos para a produção de biodiesel, através de uma série de processos tecnológicos diferentes, sendo os mais comuns a transesterificação alcoólica por via catalítica ácida, básica ou enzimática e o craqueamento catalítico ou térmico (MME; EPE, 2007).

## 2.4 Classificação das fornalhas para cogeração

No processo de cogeração a energia elétrica e térmica são geradas simultaneamente podendo alcançar uma eficiência global entre 85% a 90%, enquanto a geração isolada de eletricidade possui eficiência em torno de 40% a 45% (ALANNE; SAARI, 2004).

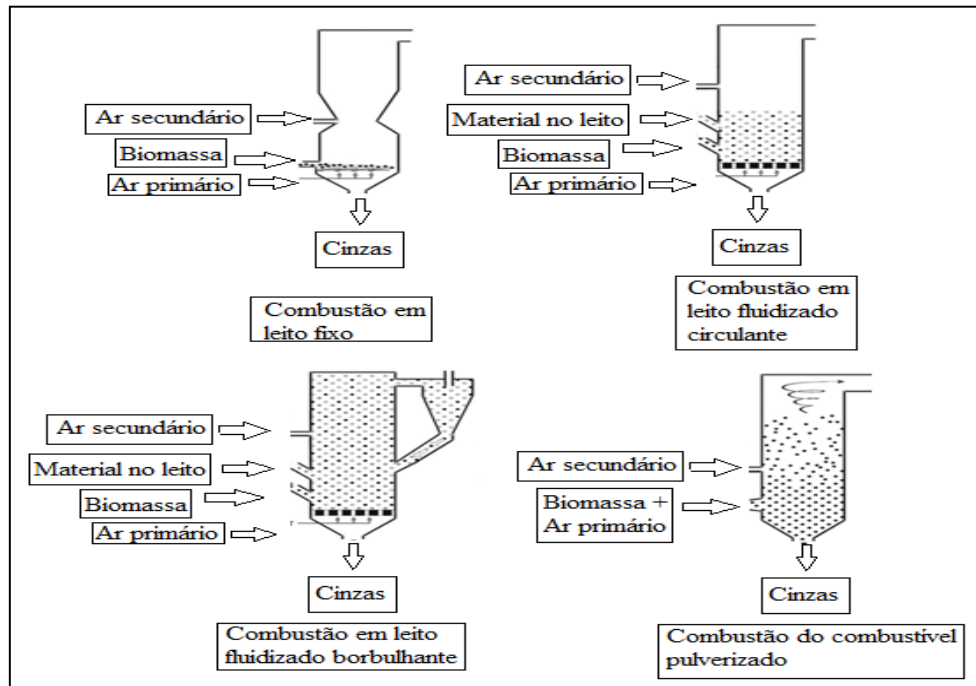
Segundo Smill (1999) os resíduos vegetais, que ultrapassam  $10 \times 10^9$  bep (barril equivalente de petróleo), são os mais utilizados, em nível mundial, para estimar o potencial energético. Na lista dos maiores produtores de cana-de-açúcar, o Brasil ocupa o primeiro lugar, com produção anual de aproximadamente 400 milhões de megatoneladas, seguido por Índia, China, Tailândia, Paquistão e México (CORTEZ; LORA; AYARZA, 2009).

As fornalhas usadas nos processos de cogeração podem variar segundo suas características construtivas. De acordo com Lora e Zampieri (2009) as fornalhas podem ser classificadas em celulares, grelha estacionária, grelha móvel, ciclônica, leito fluidizado, queima em suspensão.

A classificação das fornalhas, também dependendo da forma com que é realizada a combustão, pode ser classificada em fornalha de queima em deposição ou fornalha de queima em suspensão. No primeiro caso o combustível é queimado sobre uma grelha, e no segundo caso o combustível é queimado em todo o volume da câmara de combustão (LORA; ZAMPIERI, 2009).

As principais tecnologias para combustão da biomassa são combustão em leito fixo, combustão em leito fluidizado e combustão do combustível pulverizado (LOO; KOPPEJAN, 2008), conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Principais tecnologias de combustão para biomassa.



Fonte: Adaptado de Loo e Koppejan (2008).

No reator de leito fixo a biomassa é queimada sobre uma grelha (estacionária ou móvel) localizada no inferior do reator, onde é injetado ar atmosférico denominado ar primário. O ar secundário é colocado em uma zona de combustão separada do leito de combustível (LOO; KOPPEJAN, 2008).

As grelhas fixas são utilizadas em instalações de pequena escala, pois não há como controlar o transporte do combustível que é realizado pela forma de alimentação do sistema e gravidade, causada pela inclinação da grelha (LOO; KOPPEJAN, 2008).

Nos sistemas de leito fluidizado a queima da biomassa ocorre em suspensão, em todo o volume da câmara de combustão (LORA; ZAMPIERI, 2009). Dependendo da velocidade de fluidização, ou seja, de injeção do ar, o leito fluidizado pode ser classificado em borbulhante ou circulante (LOO; KOPPEJAN, 2008).

Nos leitos fluidizados borbulhantes, a maior parte dos sólidos fluidizados se mantém na parte inferior da câmara de combustão através da utilização de velocidades relativamente baixas de injeção do ar. Os leitos fluidizados circulantes operaram com velocidades relativamente altas de injeção do ar para promover a transição de sólidos para a parte superior do combustor. A combustão ocorre tanto na parte inferior quanto superior da câmara de combustão (EPA, 1996).

Na escolha da fornalha devem ser considerados vários aspectos, como o tipo de preparação prévia da biomassa, a quantidade e parâmetros do vapor a ser produzido, e a disponibilidade de capital (LORA; ZAMPIERI, 2009). O processo de combustão pode ser otimizado através do controle dos gases que são produzidos no interior da fornalha. Conhecendo os gases formados é possível realizar os ajustes necessários para diminuir as emissões (LOO; KOPPEJAN, 2008).

No caso da combustão da biomassa em fornalhas industriais é preciso considerar os fenômenos de combustão em camada e combustão em suspensão que ocorrem durante a combustão dentro da fornalha (LORA; ZAMPIERI, 2009).

Os mecanismos da queima na combustão podem ser alterados pela espessura da camada. Quando na combustão se tem uma camada grossa é formada uma zona de redução onde é gerado CO e voláteis devido a reação do carbono com o  $\text{CO}_2$  da combustão. Esse fenômeno ocorre porque o oxigênio fornecido é totalmente consumido na zona de oxidação (LORA; ZAMPIERI, 2009).

Quando a combustão ocorre em camada fina, não há formação de zona de redução. No intuito de garantir a queima total do combustível, tendo como produto o  $\text{CO}_2$ , se faz necessário a introdução de ar secundário acima da camada de combustível, além do ar primário introduzido na parte inferior da grelha (LORA; ZAMPIERI, 2009).

A temperatura que o ar é inserido na fornalha também influencia a eficiência da combustão. Caso o ar não seja preaquecido parte do calor gerado na combustão será usada para aquecer o ar, o que provocará interferência na eficiência da caldeira. O ideal é realizar o preaquecimento do ar, evitando assim perdas desnecessárias de calor dentro da caldeira (LORA; ZAMPIERI, 2009).

Lora e Zampieri (2009) sugerem o preaquecimento do ar na ordem de  $200^\circ\text{C}$  a  $250^\circ\text{C}$ , devido à biomassa ser um combustível com alto teor de voláteis. Na usina Japungú o ar primário entrar na fornalha com  $91,3^\circ\text{C}$  e o ar secundário com  $299,2^\circ\text{C}$ . O vapor superaquecido que sai da caldeira apresenta  $450^\circ\text{C}$ .

Analisando a combustão em suspensão pode-se admitir que as partículas dentro da fornalha passam pelo aquecimento, secagem, emissão, combustão dos voláteis e combustão do carbono fixo.

## 2.5 Valorização do bagaço da cana-de-açúcar no Brasil

A cadeia de valorização energética da biomassa pode ser composta pelas seguintes etapas: corte e produção; transporte; conversão; distribuição e aplicação da energia elétrica. A valorização da biomassa pode trazer impactos econômicos, ambientais e sociais ao longo da cadeia de produção.

Os impactos podem ser positivos ou negativos, mas dependendo do tipo de biomassa pode-se levantar algumas hipóteses sobre o prognóstico dos possíveis impactos gerados. No caso da valorização energética de um resíduo tem-se a prévia ideia que o impacto gerado deverá ser positivo, porém, é necessário estudo científico para comprovar a hipótese levantada.

O setor sucroalcooleiro possui como resíduo do seu processo produtivo o bagaço da cana. Cada tonelada de cana de açúcar produz 1/3 de toneladas de bagaço (NOVACANA, 2015d). A geração desse resíduo é um problema para diversos setores da economia.

A criação da política nacional de resíduos sólidos aumentou a pressão sobre os geradores de resíduos. O resíduo passou de um problema do Estado para um problema do gerador, essa nova realidade movimentou o mercado do pós-consumo.

O empresário tem a responsabilidade de dar um destino final ambientalmente correto para o resíduo gerado, o que nem sempre é barato. Em decorrência da valorização do mercado pós-consumo, o que antes era negligenciado passou a ser uma problemática para as empresas.

No mundo empresarial o aspecto econômico possui fundamental importância, objetiva-se que o lucro supere os dividendos. Diante desse contexto começa a preocupação com a redução dos resíduos gerados e a busca por alternativas de destino final.

O uso energético do bagaço da cana permite agregar valor econômico e ambiental a um resíduo. Além do uso como matéria prima para produção de eletricidade o bagaço também é valorizado para outras utilidades, como a venda para fazer camas para galinhas e o uso como alimento para o gado em época de estiagem.

Estudos comprovam que o poder calorífico do bagaço não é elevado, um dos motivos que se pode citar é a sua alta umidade. A baixa densidade energética da biomassa provoca a perda da eficiência na queima, além de dificuldade com armazenamento e custo com transporte.

O uso de um pré-tratamento pode ajudar a solucionar os problemas citados no parágrafo anterior. Atualmente existem diversas tecnologias de pré-tratamento da biomassa

que auxiliam na obtenção de maior potencial energético: trituração, enfardamento, peletização. As duas primeiras opções de pré-tratamento são mais eficientes se forem realizadas antes do transporte para contribuir com a redução dos custos.

A peletização já consiste em uma tecnologia mais sofisticada. Na Europa o setor de fabricação de pellets é ativo devido o uso desse tipo de material ser intenso. O clima europeu contribui para o comércio dos pellets que são usados como combustível desde os fornos de indústrias até os fogões de residências para geração de calor.

No caso da cana-de-açúcar as opções de pré-tratamentos expostas anteriormente não são atrativas, pois agregariam um custo ao processo, e tendo em vista a disponibilidade de biomassa o custo-benefício não compensaria. Entretanto, a secagem da cana antes da queima é uma opção viável.

No setor da cana-de-açúcar pode-se identificar ainda uma etapa de valorização energética dentro do processo produtivo. Na produção de álcool é necessário vapor para a fermentação alcoólica. A cogeração de energia a partir do bagaço da cana gera vapor para o processo.

Além do uso para queima é importante salientar que já se inicia pesquisas que verificam a possibilidade de produzir etanol a partir do bagaço, o chamado etanol de segunda geração, o que elevada ainda mais a valorização desse resíduo.

## **2.6 Uso da biomassa no setor sucroalcooleiro**

A indústria da cana-de-açúcar é responsável por aquecer o mercado financeiro, alterar o meio ambiente e gerar diversos emprego diretos e indiretos. Um setor com potencial impactante deve ser estudado minuciosamente para que a atividade seja realizada de maneira sustentável (CORTEZ; LORA; GÓMEZ; 2008).

Os principais subprodutos da agroindústria sucroalcooleira são águas de lavagem, bagaço, cinzas, folhas e pontas, vinhaça, torta de filtro e leveduras (NUNES et al., 2008). Normalmente, as cinzas são descartadas na natureza, sendo utilizada como adubo nas lavouras de cana-de-açúcar. Por ser constituída predominantemente de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), as cinzas podem ser utilizadas como matéria-prima para a produção de materiais pozolânicos para concreto (SOUZA et al., 2007).

Na Figura 8 pode-se verificar toda cadeia de valorização dos biocombustíveis, apresentando as diversas áreas impactadas desde a escala global dos ecossistemas até a escala molecular.

Figura 8 – Ilustração em multi-escala da cadeia de valorização dos biocombustíveis.



Fonte: Adaptado de You; Yue; Snyder (2013).

Todos os aspectos apresentados na figura influenciam os impactos gerados no setor, justificando os diversos estudos de engenharia molecular até os estudos de gestão ambiental. Além dos aspectos apresentados na figura, na área dos processos também há o aspecto do design de processo, e na área molecular tem-se as vias de reação (CORTEZ; LORA; GÓMEZ; 2008).

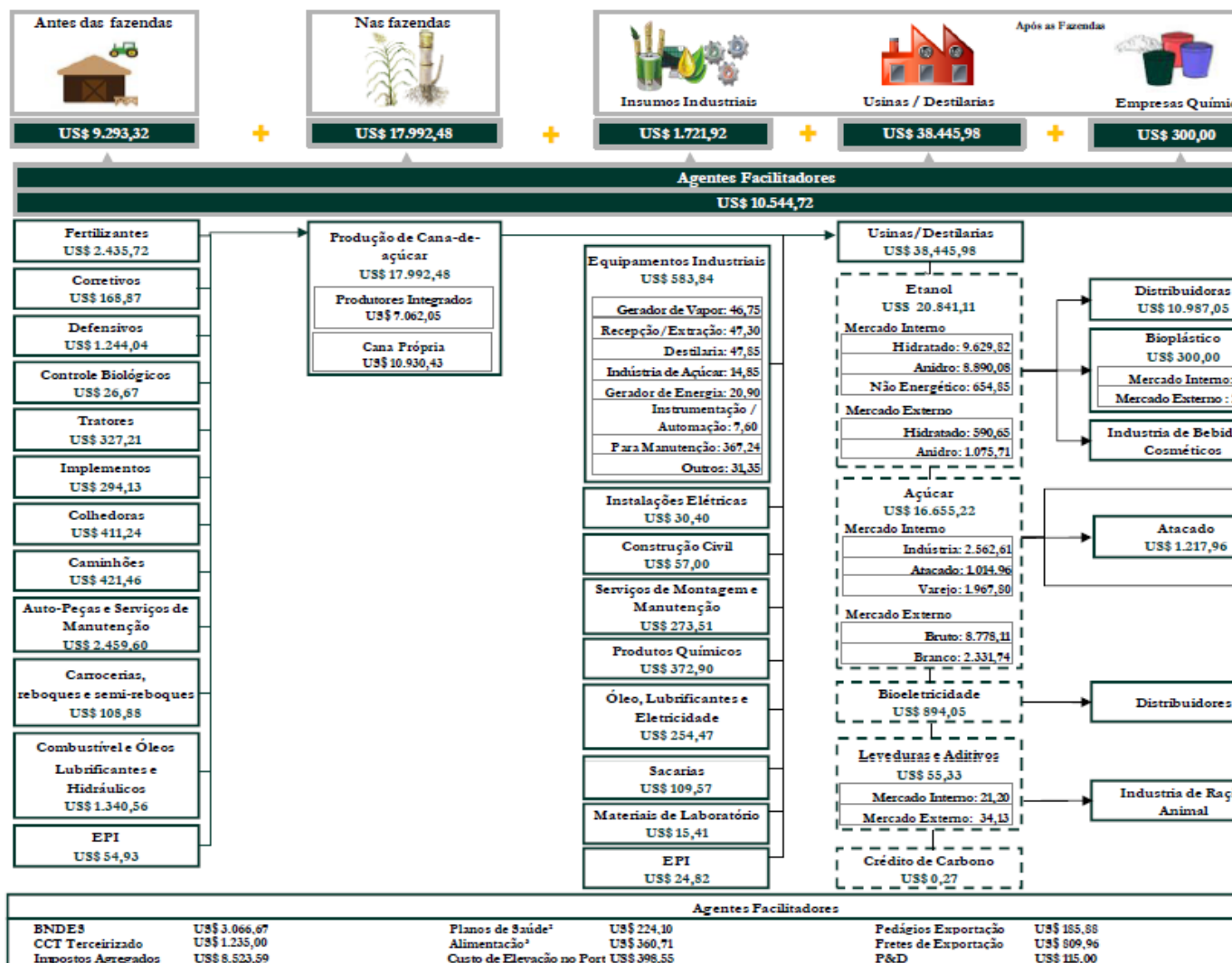
### ***2.6.1 Potencial do setor sucroalcooleiro***

O estudo coordenado por Neves e Trombin (2014) mapeou e estimou a quantificação do Sistema Agroindustrial (SAG) do Setor Sucroenergético brasileiro na safra 2013/14, compreendida entre abril de 2013 a março de 2014. A metodologia do trabalho foi baseada no método de Planejamento e Gestão Estratégica de Sistemas Agroindustriais (GESis) desenvolvido pelo professor Marcos Fava Neves em 2004.

A cadeia de valorização energética da cana-de-açúcar no Brasil possui potencial elevado. O estudo supracitado aferiu que o Produto Interno Bruto (PIB) do setor sucroenergético para a safra 2013/14 é estimado em US\$ 43,36 bilhões, o que equivale a quase 2% do PIB nacional de 2013 (Figura 9).

Na Figura 9 pode-se observar a elevada importância do setor sucroalcooleiro para a economia do Brasil, através dos dados de faturamento bruto do sistema de agroindústria da cana-de-açúcar na safra 2013/2014.

Figura 9 – Faturamento bruto do sistema agroindústria da cana de açúcar, safra 2013/2014.



Fonte: Neves; Trombin, (2014).

Na Figura 9 pode-se observar o faturamento nas fazendas sucroalcooleiras e também o faturamento antes das fazendas (fertilizantes, defensivos, tratores). Na fase anterior das fazendas é interessante destacar que as vendas de colhedoras estão sendo induzidas pelos aspectos legais, como o Protocolo Agroambiental do Estado de São Paulo, acordo voluntário firmado em 2007 que antecipou os prazos legais paulistas para a eliminação da prática da queima (NEVES; TROMBIN, 2014).

A produtividade nas fazendas em relação à safra anterior teve um aumento de 8%, porém o rendimento em Açúcar Total Recuperável (ATR) teve uma redução de 2% devido às condições climáticas (NEVES; TROMBIN, 2014).

O setor após fazendas obtiveram um faturamento estimado de US\$ 69,90 bilhões na safra. O setor é formado pela indústria de equipamentos, serviços e insumos industriais, as unidades que fabricam produtos derivados da cana de açúcar e os canais de distribuição (NEVES; TROMBIN, 2014).

Os agentes facilitadores são um conjunto de empresas que são fundamentais para o funcionamento do setor, como por exemplo o Bando Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e os investimentos em pesquisa e desenvolvimento realizados por diversas empresas e instituições. (NEVES; TROMBIN, 2014).

Dentre os principais problemas que prejudicam a competitividade do setor sucroenergético está o subaproveitamento do bagaço e palha da cana-de-açúcar. Essa é uma realidade bastante comum, embora a cadeia de valoração energética do bagaço apresente alto potencial, o fato é que o bagaço e a palha ainda não são aproveitados de maneira eficiente.

Na maioria dos casos as indústrias utilizam a queima apenas para geração de energia visando abastecer a própria usina ou gerar vapor de processo. A falta incentivos governamentais é o principal problema que desmotiva o investimento para melhor aproveitamento energético do bagaço e da palha.

### ***2.6.2 Crise do setor sucroalcooleiro***

O setor sucroenergético está em crise devido a descontinuidade da política de estímulo ao etanol, provocando uma baixa expectativa de retorno financeiro devido à inexistência de uma política de longo prazo consistente para combustíveis no Brasil (NEVES; TROMBIN, 2014).

As empresas do setor investiram pesadamente na expansão de sua capacidade de produção incentivadas pelo governo Brasileiro que estimulou a produção de veículos flex, que

utilizam álcool e gasolina e impôs a obrigatoriedade de adição de álcool à gasolina (NOVACANA, 2014c).

Entretanto, com a descoberta de petróleo da camada do pré-sal, a produção de etanol brasileiro foi prejudicada. Em junho de 2014 o endividamento da indústria sucroalcooleira já superava R\$ 60 bilhões. O governo brasileiro visando controlar os índices de inflação congelou por longos períodos o preço da gasolina, o que prejudicou o desempenho financeiro da Petrobrás e o setor sucroalcooleiro (NOVACANA, 2014c).

Como o álcool tem rendimento inferior ao da gasolina, para que o consumidor opte pelo biocombustível em detrimento do derivado de petróleo, é preciso que o preço seja atrativo. O álcool só é competitivo se seu preço não superar 70% do da gasolina. Durante a atual crise, nas últimas cinco safras, 44 usinas fecharam e outras 33 estão em regime de recuperação judicial e 12 não moerão cana neste ano (NOVACANA, 2014c).

A indústria da cana-de-açúcar ainda é muito dependente do etanol e açúcar, assim oscilações de preço podem levar o setor sucroalcooleiro à crise. Na tentativa de diminuir a dependência das tradicionais *commodities*, a indústria da cana diversifica a produção com seus subprodutos para agregar valor à atividade (NOVACANA, 2014b).

Os subprodutos da cana, como o bagaço podem ser utilizados para fabricação de biocombustíveis de segunda geração. A primeira unidade de produção do Brasil foi instalada na cidade de Piracicaba, São Paulo. (NOVACANA, 2014b).

### **2.6.3 Safra 2014/2015**

A safra 2014/2015, período de moagem de cana e produção de açúcar e etanol, iniciou oficialmente no dia 1º de abril de 2014 e termina no final de março de 2015. A entressafra consiste no período em que ocorre a reforma dos canaviais e é plantada a cultura, não sendo realizada a colheita e moagem (NOVACANA, 2014a).

A colheita e moagem ocorrem em épocas diferentes no centro-sul e norte e nordeste devido a condições climáticas. No centro-sul a colheita e moagem acontecem entre abril e novembro, no norte e nordeste ocorre entre novembro e abril (NOVACANA, 2014a).

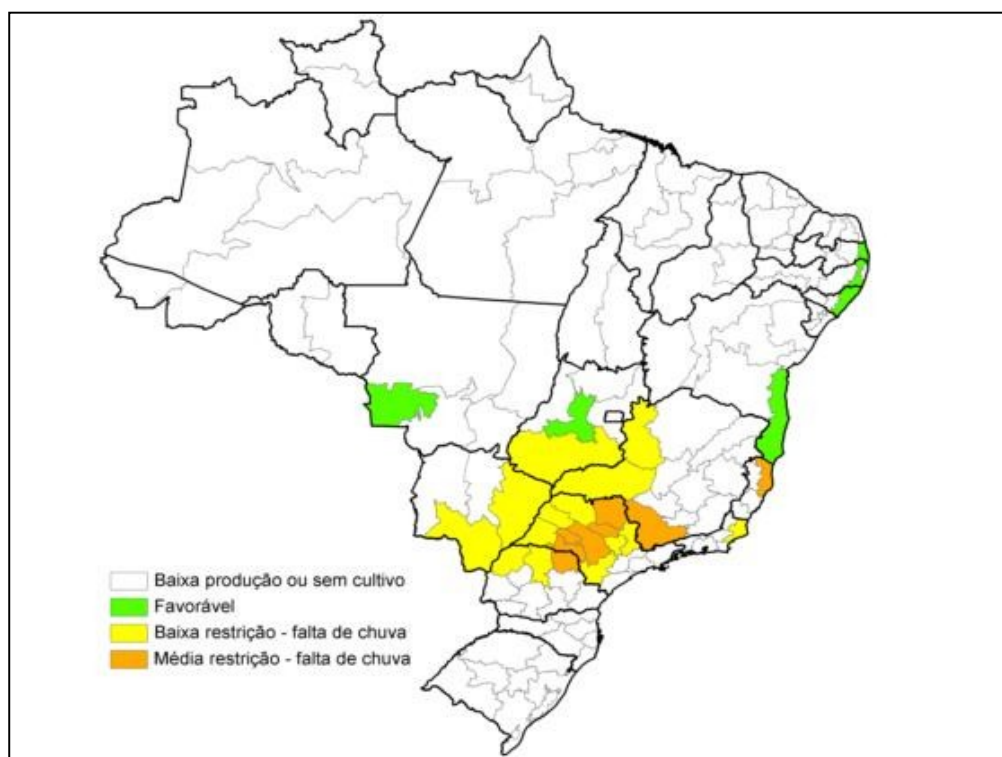
Em parceria com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) publicou em abril de 2014 o relatório a respeito da safra 2014/2015 de cana-de-açúcar do Brasil, com base em visitas realizadas em todas as unidades de produção sucroalcooleira em atividade.

Na temporada 2014/2015, a expectativa é de um acréscimo de 3,6% de área cultivada, em comparação com a safra 2013/2014, o que refletirá em um aumento de 345,5 mil hectares na área da região Centro-Sul, que recebeu mais investimentos e tratos culturais (CONAB, 2014).

O mapa da Figura 10 apresenta a condição hídrica geral para o cultivo da cana-de-açúcar nos principais estados brasileiros produtores. O período considerado para elaboração do mapa foi os meses de dezembro de 2013 a março de 2014. A maioria das regiões produtoras do centro-sul passou por uma estiagem entre os meses de dezembro de 2013 a fevereiro de 2014, tendo como consequência um declínio na produtividade da safra 2014/2015 de 1,6% na média geral em relação à safra anterior (CONAB, 2014).

A cana-de-açúcar plantada em uma safra é colhida na safra posterior, portanto, quando há condições climáticas desfavoráveis, como a falta de chuva no período do desenvolvimento vegetativo da cultura, é natural que a safra posterior apresente um decréscimo na produtividade.

Figura 10 – Condição hídrica geral para o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil.



Fonte: Conab (2014).

Entretanto, as chuvas reduzidas foram favoráveis ao Nordeste que estava em período de maturação e colheita da cana-de-açúcar da safra 2013/2014. As chuvas em março

contribuíram para o desenvolvimento nas regiões de Pernambuco, Paraíba e Bahia (CONAB, 2014).

Quanto à produtividade, o crescimento no rendimento da cultura no Nordeste foi de 6,3% em relação à safra 2013/14, o que mostra uma recuperação dos canaviais que sofreram uma das maiores secas da região. No Centro-Sul houve uma queda na produtividade de 2,6%, reflexo da falta de chuvas (CONAB, 2014).

A safra 2014/2015 apresentou um crescimento de 3,6% de área destinada a produção de cana em comparação com a safra anterior. A área cultivada com cana-de-açúcar distribuída em todos Estados produtores será de aproximadamente 9.130,1 mil hectares (CONAB, 2014).

A produção total de cana-de-açúcar moída na safra 2014/2015 é estimada em 671,69 milhões de toneladas, com aumento de 2% em relação à safra anterior, esse aumento para processamento é reflexo das unidades de usinas novas e em fase de consolidação, nos estados de São Paulo, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. A região Norte e Nordeste prevê aumento de 3,7% na produção de cana em relação à safra 2013/2014 (CONAB, 2014).

## **2.7 Legislação Ambiental Brasileira**

O crescimento acelerado urbano e industrial brasileiro, e consequente aumento da poluição atmosférica motivou o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) a instituir o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), através da resolução CONAMA nº 05/89. A estratégia básica do PRONAR consiste em limitar as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle (CONAMA, 1989).

Em atendimento a resolução CONAMA nº 382/2006 e nº 436/2011, os proprietários das usinas de cana-de-açúcar que utilizam a tecnologia da combustão externa do bagaço devem realizar amostragem em chaminé, pelo menos uma vez por safra, nas condições de plena carga, para verificar o atendimento aos limites estabelecidos pelas citadas legislações.

A Resolução CONAMA nº 382/2006 estabelece os limites de emissão de poluentes atmosféricos gerados em processos de geração de calor a partir da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 1). Segundo a resolução CONAMA nº 382/2006, os valores devem estar em mg/Nm<sup>3</sup> em base seca, com 8% de excesso de ar.

Tabela 1 – Valores máximos permitidos de emissão de MO e NOx (monóxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio).

| Potência térmica nominal | MO  | NOx           |
|--------------------------|-----|---------------|
| Menor que 10             | 280 | Não Aplicável |
| Entre 10 e 75            | 230 | 350           |
| Maior que 75             | 200 | 350           |

Fonte:(CONAMA, 2006).

Entretanto, as fontes fixas de emissão instaladas ou com licença de instalação requerida antes de 2 de janeiro de 2007 devem obedecer os limites máximos de emissão previstos na Resolução CONAMA nº 436 de 2011. Portanto, as usinas que utilizam a combustão externa da biomassa da cana nas condições supracitada deverão seguir os limites de emissão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores máximos permitidos de emissão de Material Particulado (MP) e NOx (monóxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio).

| Potência térmica nominal (MW) | MP  | NOx           |
|-------------------------------|-----|---------------|
| MW<50                         | 520 | Não Aplicável |
| 50<MW<100                     | 450 | 350           |
| MW>100                        | 390 | 350           |

Fonte: (CONAMA, 2011).

A CONAMA nº 382/2006 estabelece que o órgão ambiental licenciador possa aceitar apenas o monitoramento de monóxido de carbono, nos sistemas que apresentam potência de até 10 MW. A CONAMA nº 436/2011 manteve essa opção já estabelecida, com os respectivos limites, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Valores máximos permitidos de emissão de monóxido de carbono (CO).

| Potência térmica nominal (MW) | CO   |
|-------------------------------|------|
| MW<0,05                       | 6500 |
| 0,05<MW<0,15                  | 3250 |
| 0,15<MW<1                     | 1700 |
| 1<MW<10                       | 1300 |

Fonte: (CONAMA, 2006).

A unidade de concentração de todos os resultados das tabelas é  $\text{mg/Nm}^3$ , em base seca e 8% de excesso de oxigênio.

Ressalta-se que segundo a resolução CONAMA nº 3 de 1990, o monitoramento da qualidade do ar é atribuição dos Estados (CONAMA, 1990).

A Superintendência de Administração do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos da Paraíba (SUDEMA) foi criada através da Lei nº 4.033 de 20 de dezembro de 1978, dentre outros, com o objetivo de avaliar e controlar as atividades referentes à proteção ambiental, controle da poluição, a nível estadual (PARAÍBA, 1978).

### 3 METODOLOGIA

A divisão do território brasileiro se dá em cinco macro regiões: Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-oeste. O estudo de caso da pesquisa está localizado no estado da Paraíba, região nordeste do Brasil. O Estado da Paraíba possui 223 municípios, com área igual a 56.469,778 km<sup>2</sup> e população estimada para 2014 de 3.943.885 habitantes.

Na primeira etapa da pesquisa foram obtidos dados secundários com o intuito de caracterizar a problemática em estudo e analisar a valorização energética do bagaço no Brasil, sob a perspectiva da matriz energética brasileira.

Os dados secundários da pesquisa foram obtidos através de busca bibliográfica nas páginas dos órgãos responsáveis pela gestão da energia do Brasil disponível na internet, em livros que abordam o tema da matriz energética e biomassa, em artigos científicos.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) disponibiliza no seu site planilha referente à matriz de energia, onde constam todos os empreendimentos geradores de eletricidade em operação no Brasil, e suas respectivas fontes energéticas e potências geradas fiscalizadas.

Através de busca no site da ANEEL identificou-se os empreendimentos em operação no nordeste do país que utilizam como fonte o bagaço da cana-de-açúcar para cogeração de eletricidade, e suas respectivas potências.

Os dados primários do estudo, utilizados para calcular o balanço mássico foram obtidos durante visita técnica a Destilaria Agroindustrial Japungú S/A, localizada no município de Santa Rita no estado da Paraíba, que utiliza em seu processo industrial a tecnologia da cogeração. Na Figura 11 pode-se observar a localização da destilaria.

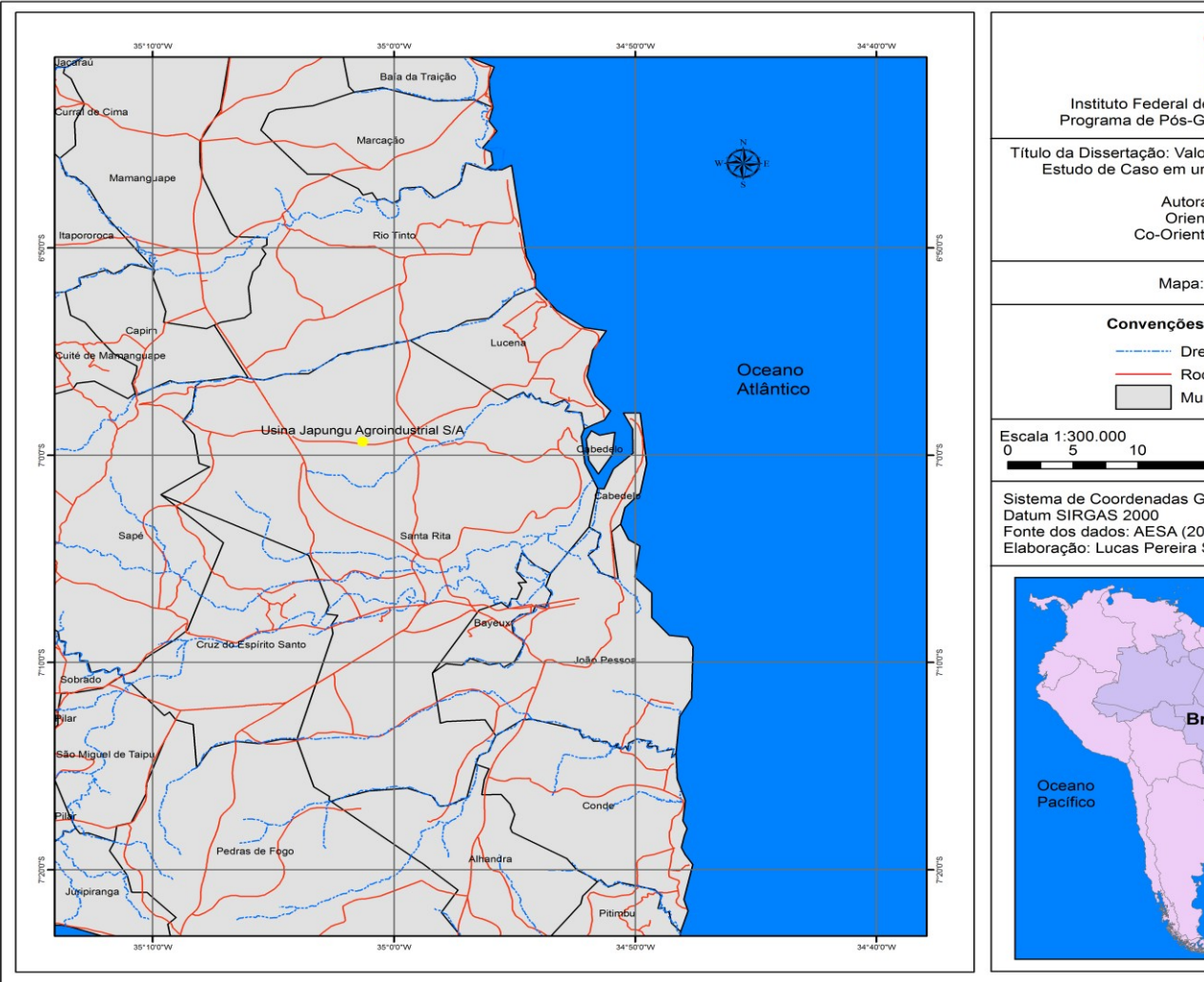
Na oportunidade da visita foi possível obter parâmetros operacionais da fábrica (funcionamento da caldeira, geradores e quantidades de insumos e resíduos), realizar registros fotográficos do processo produtivo e identificar o processo de cogeração do bagaço.

O potencial do uso do bagaço para cogeração de energia foi identificado através da análise da matriz energética nacional e dos dados obtidos do estudo de caso.

Durante a primeira fase da pesquisa foi iniciado um convênio de cooperação entre a Universidade de Aveiro e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, atualmente em apreciação. Entretanto, a parceria entre o Laboratório de energias renováveis e conforto ambiental do IFCE e o Departamento de ambiente e ordenamento da Universidade de Aveiro permitiu que fosse dada continuidade da segunda parte da pesquisa na Universidade de Aveiro.

Na oportunidade do intercâmbio, visando aprimorar o conhecimento na temática e aprofundar o tema da presente pesquisa foi realizada participação na disciplina de conversão de energias renováveis, presente na matriz curricular do mestrado em sistemas energéticos sustentáveis. Nesta etapa também foram realizados o tratamento dos dados coletados em campo, elaborado o balanço mássico dos fluxos de energia da usina Japungú e criado os fluxogramas de entradas e saídas de materiais.

Figura 11 – Mapa de localização da usina Japungú S/A.



Fonte: Dados da pesquisa.

### 3.1 Cálculos do balanço mássico

Nessa seção será avaliado o fluxo material na geração de calor e eletricidade, apresentando os inputs e outputs para um período de funcionamento de 258 dias de funcionamento da caldeira, em 256 dias de safra. Os dois dias a mais de funcionamento da caldeira ocorreu devido à liquidação final de todo o caldo de cana que tinha na destilaria quando ela parou.

Considerou-se para os cálculos aqui expostos que durante o processo de combustão de biomassa temos como recurso a ser utilizado a biomassa (incluindo inertes e água) e o ar de combustão, que geram como produtos gases de exaustão, cinzas volantes e escória (LOURENÇO, 2011) Ressalta-se que os cálculos foram efetuados com base no consumo de biomassa em base seca e sem inertes.

Durante o processo de cálculo do balanço mássico foram necessários dados da análise imediata e elementar do bagaço da cana-de-açúcar, obtidos de Castro (2009), conforme apresentado nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Análise imediata da biomassa.

| <b>Análise imediata da biomassa em base tal e qual (btq)</b> |       |
|--------------------------------------------------------------|-------|
| Umidade (wW1)                                                | 0,5   |
| Voláteis                                                     | 0,393 |
| Carbono fixo                                                 | 0,07  |
| Cinzas                                                       | 0,037 |
| Total                                                        | 0,037 |

Fonte: Castro (2009).

Tabela 5 - Análise elementar da biomassa.

| <b>Análise elementar (base mássica) da biomassa em base seca (bs)</b> |                             |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| C                                                                     | 0,4515 (kgC/kg biomassa bs) |
| H                                                                     | 0,054 (kgH/kg biomassa bs)  |
| N                                                                     | 0,002 (kgN/kg biomassa bs)  |
| S                                                                     | 0,0002 (kgS/kg biomassa bs) |
| O1                                                                    | 0,418 (kgO/kg biomassa bs)  |
| Z1                                                                    | 0,074 (kgZ/kg biomassa bs)  |
| W1                                                                    | 1 (humidade bs)             |

Fonte: Castro (2009).

### 3.1.1 Quantidade de ar atmosférico necessária para combustão do bagaço

A vazão de ar que deve alimentar a fornalha, pode ser calculada aplicando a fórmula 1:

$$\dot{V}_{ar} = \dot{V}_a * \dot{m}_{biomassa} \quad (1)$$

- $\dot{V}_{ar}$ : vazão de ar atmosférico (Nm<sup>3</sup> de ar por segundo);
- $\dot{V}_a$ : quantidade total de ar atmosférico necessário (Nm<sup>3</sup> de ar por kg de biomassa em base seca);
- $\dot{m}_{biomassa}$ : vazão da biomassa (kg de biomassa em base seca por segundo).

### 3.1.2 Vazão da biomassa necessária para combustão completa da biomassa

A vazão da biomassa, ou seja, a quantidade de biomassa necessária para atender a usina pode ser calculada pela divisão da potência térmica pelo poder calorífico inferior da biomassa (equação 2).

$$\dot{m}_{biomassa} = \dot{Q}_{termica} \div PCI_{biomassa} \quad (2)$$

- $\dot{m}_{biomassa}$ : vazão da biomassa;
- $\dot{Q}_{termica}$ : potência térmica;
- $PCI_{biomassa}$ : Poder Calorífico Inferior da biomassa.

Por sua vez, a potência térmica pode ser calculada pela divisão entre a potência elétrica o rendimento térmico, que consiste no rendimento global de conversão energética do combustível em energia térmica na forma de vapor (equação 3).

$$\dot{Q}_{termica} = \dot{Q}_{vapor} \div \eta \quad (3)$$

- $\dot{Q}_{vapor}$ : potência elétrica da biomassa;
- $\dot{Q}_{termica}$ : potência térmica da biomassa;
- $\eta$ : rendimento térmico.

A potência elétrica da biomassa é o resultado da multiplicação entre a entalpia específica e vazão de vapor produzido pela fornalha da usina. A entalpia específica (kJ por kg de vapor) pode ser encontrada em uma tabela de vapor, com base na temperatura e pressão do vapor superaquecido da caldeira.

### ***3.1.3 Quantidade de ar necessária para a combustão completa da biomassa***

É fundamental conhecer o valor de excesso de ar a ser utilizado durante o processo de combustão para definir a quantidade de ar total necessária para que ocorra a combustão completa do bagaço (WaA), equação 5.

O excesso de ar surge para garantir a combustão completa do combustível, tendo em vista a dificuldade de se obter uma mistura perfeita entre o ar com o combustível, além do tempo limitado de permanência do combustível na câmara de combustão que dificulta o processo. Portanto, é preciso fornecer um volume de ar maior para garantir a combustão completa do combustível (LORA; ZAMPIERI, 2009).

A redução na umidade do combustível permite trabalhar com um coeficiente de excesso de ar menor, pois, como as partículas estão mais leves permite melhor mistura ar e combustível (LORA; ZAMPIERI, 2009).

Antes de obter o valor de ar total necessário para combustão da biomassa, é preciso ainda encontrar a necessidade estequiométrica do oxigênio para combustão. Considerando as condições normais de temperatura e pressão, pode-se descobrir o valor de oxigênio estequiométrico aplicando a equação 4.

$$W_s = \left[ \sum \left( Y_{s,j} * \frac{W_j}{M_j} \right) - \frac{W_o}{M_{O_2}} \right] M_{O_2} \quad (4)$$

- j: elemento químico;
- Wj: fração mássica de j (kg j por kg do combustível em base seca);
- Mj: fração molar de j (kg j por kmol j).
- Ys,j: consumo estequiométrico de O<sub>2</sub> (kmol O<sub>2</sub> por kmol j).

Os valores do consumo estequiométrico de oxigênio de cada elemento químico ( $Y_{s,j}$ ), considerado para o balanço mássico desse estudo, estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Consumo estequiométrico de oxigênio por elemento químico.

| <b>kmole O<sub>2</sub></b><br><b>estequiométrico por</b><br><b>kmole do elemento</b> |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| $Y_C$                                                                                | 1,00 |
| $Y_H$                                                                                | 0,25 |
| $Y_N$                                                                                | 0,00 |
| $Y_S$                                                                                | 1,00 |

Fonte: Tarelho (2014).

A massa molar dos elementos químicos necessárias para realização dos cálculos desse estudo encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Massa molar das espécies químicas.

| <b>Massa molar das</b><br><b>espécies químicas</b> |                              |
|----------------------------------------------------|------------------------------|
| $M_C$                                              | 12 (KgC/kmol)                |
| $M_H$                                              | 1 (KgH/kmol)                 |
| $M_N$                                              | 14 (KgN/kmol)                |
| $M_S$                                              | 32,1 (KgS/kmol)              |
| $M_O$                                              | 16 (KgO/kmol)                |
| $M_{H_2O}$                                         | 18 (KgH <sub>2</sub> O/kmol) |
| $M_{O_2}$                                          | 32 (KgO <sub>2</sub> /kmol)  |
| $M_{N_2}$                                          | 28 (KgN <sub>2</sub> /kmol)  |

Fonte: Baird (2002).

Conhecendo as necessidades estequiométricas de oxigênio ( $W_s$ ) pode-se determinar as necessidades estequiométricas de ar de combustão ( $W_{sa}$ ), dado em kg de ar por kg de combustível em base seca. Os cálculos foram realizados considerando a oxidação

completa dos elementos químicos. Entretanto, para efeito de cálculo não foram considerados o azoto e o cloro devido apresentarem frações mássicas relativamente baixas no combustível.

O ar total necessário para combustão pode ser obtido multiplicando o valor encontrado do ar estequiométrico para combustão pela razão estequiométrica, encontrada a partir da percentagem de excesso de ar, conforme equação 5. O  $W_{aA}$  é dado por kg de ar por kg de combustível em base seca.

$$W_{aA} = W_{sa} * r \quad (5)$$

### ***3.1.4 Produtos Gerados na combustão***

#### ***3.1.4.1 Produtos sólidos da combustão***

Ao final da queima da biomassa surgem os produtos da combustão, uma parte inerte à combustão (cinzas) e uma parte orgânica. A parte orgânica é composta basicamente por carbono, podendo sair do sistema de combustão como cinzas de fundo (escória) e material volante que acompanha o efluente gasoso (LOURENÇO, 2011).

A percentagem de carbono inqueimado ( $W_c$ ) pode ser obtida com base na eficiência de conversão do carbono e a percentagem de carbono presente na biomassa (equação 6).

$$W_{c.inqueimado} = (1 - E_{f.c}) * W_c \quad (6)$$

- $W_{c.inqueimado}$  : kg de carbono inqueimado por kg de biomassa em base seca;
- $E_{f.c}$  : Eficiência de conversão do carbono;
- $W_c$  : percentagem mássica de carbono presente na biomassa.

Os produtos sólidos da combustão é o resultado da soma do carbono inqueimado e as cinzas (inerte), equação 7.

$$W_{E+Z} = W_{c.inqueimado} + W_z \quad (7)$$

- $W_{E+Z}$ : kg de produtos sólidos (cinzas de fundo e cinzas volantes) por kg de biomassa em base seca;
- $W_{c.inqueimado}$ : kg de carbono inqueimado por kg de biomassa em base seca;
- $W_Z$ : percentagem mássica de cinzas presente na biomassa.

Sabendo a percentagem de produtos sólidos presentes como volante calculamos o volante produzido. Multiplica-se a percentagem de produtos sólidos presentes como volantes pelo valor total dos produtos sólidos ( $W_{E+Z}$ ).

Tal qual o calculo do volante, a quantidade de escória produzida será resultado da multiplicação do valor total dos produtos sólidos produzidos ( $W_{E+Z}$ ) percentagem de produtos sólidos presentes como escória.

#### 3.1.4.2 Produtos Gasosos da Combustão

O balanço mássico elementar, indicando a abundância de cada elemento por unidade de biomassa (R), em base seca, foi realizado aplicando as seguintes equações (TARELHO, 2014):

- Dióxido de carbono ( $CO_2$ )

$$n_{CO_2} = \frac{W_C}{M_C} - n_{CO} - \frac{(W_V * W_{CV} + W_E * W_{CE})}{M_C} \quad (8)$$

- Água ( $H_2O$ )

$$n_{H_2O} = \frac{W_H}{2 * M_H} + \frac{W_W}{M_{H_2O}} + W_a * W_{Va} * \frac{7,63}{32} - n_{H_2} \quad (9)$$

$W_{Va}$ : vazão de mistura para o ar atmosférico kg de água por kg de ar seco.

- Oxigênio (O<sub>2</sub>)

$$n_{O_2} = \left[ \left( \frac{W_o}{M_{O_2}} \right) + 0,5 * \left( \frac{W_W}{M_{H_2O}} \right) + \left( \frac{W_a}{M_{O_2}} \right) * \left( 1 + (0,5 * W_{Va} * 7,63) \right) \right] - \left[ \left( n_{CO_2} \right) - \left( \frac{n_{H_2O}}{2} \right) - \left( \frac{n_{CO}}{2} \right) - \left( \frac{n_{NO}}{2} \right) - \left( n_{SO_2} \right) \right] \quad (10)$$

- Azoto (N<sub>2</sub>)

$$n_{N_2} = \frac{\left( \frac{W_N}{M_N} + 2 * \left( \frac{W_a}{M_{O_2}} \right) * 3,76 - \left( n_{NO} \right) \right)}{2} \quad (11)$$

- Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)

$$n_{SO_2} = \frac{W_s}{M_s} \quad (12)$$

O valor de produção dos gases úmidos monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H<sub>2</sub>), óxido nítrico (NO) foram igual à zero.

Para calcular a produção dos gases úmidos da combustão temos que somar os gases úmidos referentes a cada elemento, então teremos a razão de gases úmidos de combustão produzidos por unidade de massa de combustível (equação 13).

$$G_t = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{SO_2} + n_{CO} + n_{H_2} + n_{NO} \quad (13)$$

A composição molar dos gases úmidos de combustão ( $\bar{Y}_i$ ) pode ser obtida pela divisão entre kmol de cada elemento ( $n_i$ ) dividido pelo kmol da mistura de gases úmidos ( $G_t$ ), equação 14.

$$y_i = \frac{n_i}{G_t} \quad (14)$$

Já a razão de gases secos de combustão produzido por unidade de massa de combustível pode ser encontrado aplicando a equação 15, que não apresenta o  $n_{H_2O}$ .

$$G_{t,s} = n_{CO_2} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{SO_2} + n_{CO} + n_{H_2} + n_{NO} \quad (15)$$

Portanto, a composição molar dos gases secos de combustão será o kmol de cada elemento ( $n_i$ ), excluindo o  $n_{H_2O}$ , pelo kmol da mistura de gases secos ( $G_{t,s}$ ).

$$y_{i,s} = \frac{n_i}{G_{t,s}} \quad (16)$$

A vazão mássica total dos gases na exaustão pode ser obtida aplicando a equação 17.

$$\dot{m}_{gases} = G_{t,s} * M_{gases} * \dot{m}_{biomassa} \quad (17)$$

- $\dot{m}$ : kg de gases por kg de biomassa em base seca (vazão mássica dos gases);
- $G_{t,s}$ : kmol de gases por kg de biomassa em base seca;
- $M_{gases}$ : kg de gases por mol de gases;
- $\dot{m}_{biomassa}$ : kg de biomassa em base seca por segundo.

A quantidade de gases produzida por mol pode ser obtida através do somatório da massa molar dos elementos multiplicado pelas respectivas percentagens de cada elemento no gás de exaustão.

$$M_{gases} = \sum Y_i * M_i \quad (18)$$

Tendo a vazão mássica dos gases na exaustão é possível encontrar a vazão volumétrica através da aplicação da equação dos gases ideais, a saber:

$$PV = nRT \Leftrightarrow V = \frac{nRT}{P} \quad (19)$$

- P: pressão (101300 Pa);
- V: volume (Nm<sup>3</sup>Pa/Kmol);
- $n$ : moles de gás (  $n = \dot{m}_{\text{gases}}/M_{\text{gases}}$  );
- R: constante universal dos gases perfeitos;
- T: temperatura (Kelvin).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Usinas de Cana de açúcar do Brasil

A matriz de energia elétrica brasileira é bem diversificada, isto se deve principalmente a disponibilidade de recursos naturais. Os geradores de energia do Brasil são compostos por usinas que utilizam fontes tradicionais e usinas que usam recursos renováveis. Entretanto, ressalta-se que ainda há uma dependência da energia hidrelétrica e petrolífera.

Em 2014 das 3.127 usinas brasileiras 387 eram movidas a bagaço de cana, atualmente, início de 2015, o país conta com 3.600 usinas geradoras de energia em operação, das quais 406 são movidas a bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 8).

A Tabela 8 lista os empreendimentos geradores de energia elétrica no Brasil de acordo com a fonte e respectiva capacidade instalada.

Tabela 8 – Empreendimentos em operação geradores de energia elétrica no Brasil.

(continua)

| Empreendimentos em Operação |                          |                                 |              |                  |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------|------------------|
| Fonte                       |                          | Capacidade Instalada            |              |                  |
| Origem                      | Fonte nível 1            | Fonte nível 2                   | nº de Usinas | (KW)             |
| <b>Biomassa</b>             | <b>Agroindustriais</b>   | <b>Bagaço de cana de Açúcar</b> | <b>406</b>   | <b>9.880.703</b> |
|                             |                          | Biogás – AGR                    | 2            | 1.722            |
|                             |                          | Capim Elefante                  | 2            | 31.700           |
|                             |                          | Casca de Arroz                  | 10           | 37.533           |
|                             |                          | Óleos vegetais                  | 3            | 19.110           |
|                             |                          | Carvão vegetal                  | 7            | 51.400           |
|                             |                          | Gás de Alto Forno – Biomassa    | 7            | 107.865          |
|                             |                          | Licor Negro                     | 17           | 1.785.102        |
|                             |                          | Resíduos de Madeira             | 46           | 357.725          |
|                             | Resíduos animais         | Biogás- RA                      | 12           | 1.361            |
|                             | Resíduos sólidos urbanos | Biogás – RU                     | 11           | 66.971           |

Tabela 8 – Empreendimentos em operação geradores de energia elétrica no Brasil.

(conclusão)

| Empreendimentos em Operação |                      |                                |       |             |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------------|-------|-------------|
| Fonte                       |                      | Capacidade Instalada           |       |             |
| Eólica                      | Cinética do vento    | Cinética do vento              | 232   | 4.980.689   |
|                             |                      | Carvão mineral                 | 1     | 24.400      |
|                             | Gás Natural          | Carvão Mineral                 | 13    | 3.389.465   |
|                             |                      | Gás de Alto Forno – CM         | 8     | 179.290     |
|                             |                      | Calor de Processo – GN         | 1     | 40.000      |
| Fóssil                      | Outros Fósseis       | Gás Natural                    | 121   | 12.735.996  |
|                             |                      | Calor de Processo – OF         | 2     | 149.300     |
|                             | Petróleo             | Gás de Refinaria               | 7     | 339.960     |
|                             |                      | Óleo Combustível               | 34    | 4.083.973   |
|                             |                      | Óleo Diesel                    | 1184  | 3.592.359   |
| Hídrica                     | Potencial hidráulico | Outros Energéticos de Petróleo | 15    | 925.208     |
|                             |                      | Potencial hidráulico           | 1159  | 89.225.511  |
| Nuclear                     | Urânio               | Urânio                         | 2     | 1.990.000   |
| Solar                       | Radiação solar       | Radiação solar                 | 317   | 15.179      |
| Total                       |                      |                                | 3.619 | 134.012.522 |

Fonte: adaptado de ANNEL (2015).

Nesta tabela constam somente os empreendimentos nacionais, mas o Brasil também importa energia do Paraguai, Argentina, Venezuela e Uruguai. Somando a energia importada desses países tem-se o valor de 8.170.000 kW, totalizando 142.182.522 kW de capacidade instalada (ANNEL, 2015).

Segundo estudo publicado em 2010, o Brasil possuía 434 usinas sucroalcooleiras, todas autossuficientes em energia, porém, somente 20% das usinas (88 unidades) comercializavam os seus excedentes de energia elétrica no mercado, sendo 54 centrais de cogeração exportando energia elétrica para a rede de transmissão no estado de São Paulo e 34 centrais em outros 11 estados brasileiros (IPEA, 2010).

Ainda, no estudo supracitado, estimou-se que se fosse aproveitada plenamente toda a biomassa de cana disponível no país, seria possível agregar à rede elétrica um volume de energia da ordem de 11.000 MW médios até a safra 2018-2019, o que equivale a uma usina do porte de Itaipu (IPEA, 2010).

De acordo com Soares e Rossell (2006), a partir de 1999, com a privatização do setor de energia elétrica criou-se a figura do Produtor Independente de Energia, abrindo um novo mercado para as usinas.

Com esse incentivo algumas usinas modificaram o seu sistema de geração de vapor e energia, passando de uma configuração de baixa eficiência, que tinha por finalidade consumir o bagaço gerado, para uma nova concepção onde se procura utilizar o bagaço excedente para a geração de energia elétrica (SOARES; ROSSELL, 2006).

É necessário aumentar os incentivos e criar uma política consistente para viabilizar a venda de eletricidade excedente das usinas para as concessionárias de energia elétrica.

Conforme pode-se observar na tabela 9, no nordeste do Brasil estão localizadas 55 usinas que utilizam como combustível o bagaço da cana-de-açúcar, tendo com destino da energia a Produção Independente de Energia (PIE), Autoprodução de Energia (APE) e Registro (REG).

Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível, localizadas na região Nordeste do Brasil (2015).

(continua)

| <b>Usina</b> | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>Destino da Energia</b> | <b>Proprietário</b>                           | <b>Município</b>       |
|--------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|
|              |                                  |                           | 100% para Usina                               |                        |
| Pumaty       | 8.040                            | APE                       | Pumaty S/A<br>Industria de<br>Açúcar e Álcool | Joaquim<br>Nabuco - PE |
|              |                                  |                           | 100%                                          |                        |
| Uruba        | 10.000                           | PIE                       | para Laginha<br>Agro Industrial<br>S/A        | Atalaia - AL           |

Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível, localizadas na região Nordeste do Brasil (2015).

(continuação)

| <b>Usina</b> | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>Destino da Energia</b> | <b>Proprietário</b>                                        | <b>Município</b>            |
|--------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Guaxuma      | 14.312                           | APE                       | 100% para Laginha Agro Industrial S/A                      | Coruripe – AL               |
| JB           | 33.200                           | PIE                       | 100% para Companhia Alcoolquímica Nacional - Alcoolquímica | Vitória de Santo Antão – PE |
| Cachoeira    | 7.400                            | PIE                       | 100% para Usina Caeté S.A                                  | Maceió - AL                 |
| Itaenga      | 47.000                           | PIE                       | 100% para Termo Elétrica Itaenga Ltda                      | Lagoa do Itaenga - PE       |
| Marituba     | 20.500                           | PIE                       | 100% para Usina Caeté S.A                                  | Igreja Nova – AL            |
| Serra Grande | 17.200                           | APE                       | 100% para Usina Serra Grande S/A                           | São José da Laje – AL       |
| Cucaú        | 12.600                           | PIE                       | 100% para Zihuatanejo do Brasil Açúcar e Álcool Ltda       | Rio Formoso – PE            |
| Sumaúma      | 4.000                            | REG                       | 100% para Central Bioenergética Ltda                       | Marechal Deodoro - AL       |

Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível, localizadas na região Nordeste do Brasil (2015).

(continuação)

| <b>Usina</b>        | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>Destino da Energia</b> | <b>Proprietário</b>                     | <b>Município</b>        |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| Paísa               | 4.800                            | REG                       | 100% para Central Bioenergética Ltda    | Penedo - AL             |
| Capricho            | 2.400                            | REG                       | 100% para Central Bioenergética Ltda    | Cajueiro - AL           |
| Laginha-Matrix      | 4.950                            | REG                       | 100% para Laginha Agro Industrial S/A   | União dos Palmares – AL |
| Baía Formosa        | 40.000                           | PIE                       | 100% para CPFL BIO FORMOSA S.A          | Baía Formosa – RN       |
| Trapiche            | 26.000                           | APE                       | 100% para Usina Trapiche S/A            | Sirinhaém – PE          |
| Estivas             | 17.000                           | PIE                       | 100% para BIOSEV S.A                    | Arês – RN               |
| Central Olho D Água | 4.200                            | PIE                       | 100% para Usina Central Olho D Água S/A | Camutanga – PE          |
| União e Indústria   | 4.600                            | PIE                       | 100% para Termelétrica União Ltda       | Primavera – PE          |

Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível, localizadas na região Nordeste do Brasil (2015).

(continuação)

| <b>Usina</b>           | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>Destino da Energia</b> | <b>Proprietário</b>                                    | <b>Município</b>          |
|------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|
| Agrovale               | 14.000                           | PIE                       | 100% para Agro Indústrias do Vale do São Francisco S/A | Juazeiro - BA             |
| Ipojuca                | 9.200                            | REG                       | 100% para Usina Ipojuca S/A                            | Ipojuca - PE              |
| Jitituba Santo Antônio | 27.400                           | PIE                       | 100% para Central Energética Jitituba Ltda             | São Luís do Quitunde – AL |
| Una Açúcar e Energia   | 3.000                            | REG                       | 100% para Una Açúcar e Energia Ltda                    | Tamandaré – PE            |
| Sinimbu                | 18.000                           | PIE                       | 100% para Central Energética Vale do Jequiá Ltda       | Jequiá da Praia - AL      |
| Santa Teresa           | 20.200                           | PIE                       | 100% para Empresa Energética Santa Teresa Ltda         | Goiana - PE               |
| Giasa II               | 30.000                           | PIE                       | 100% para BIOSEV S.A                                   | Pedras de Fogo - PB       |
| São José               | 25.520                           | PIE                       | 100% para Usina São José S/A                           | Igarassu - PE             |

Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível, localizadas na região Nordeste do Brasil (2015).

(continuação)

| <b>Usina</b> | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>Destino da Energia</b> | <b>Proprietário</b>                                  | <b>Município</b>      |
|--------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|
| Seresta      | 9.500                            | PIE                       | 100% para Central Energética Seresta Ltda            | Teotônio Vilela - AL  |
| Coruripe     | 16.000                           | PIE                       | 100% para S/A Usina Coruripe Açúcar e Álcool         | Coruripe – AL         |
| Petribu      | 36.500                           | APE                       | 100% para Usina Petribu S/A                          | Lagoa do Itaenga - PE |
| Ribeirão     | 6.400                            | PIE                       | 100% para Ribeirão Energia Ltda                      | Ribeirão - PE         |
| Triunfo      | 14.000                           | APE                       | 100% para Triunfo Agro Industrial S/A                | Boca da Mata – AL     |
| Pedrosa      | 4.400                            | REG                       | 100% para Vale Verde Empreendimentos Agrícolas Ltda. | Cortês - PE           |
| Sali         | 9.900                            | APE                       | 100% para S.A. Leão Irmãos Açúcar e Álcool           | Rio Largo – AL        |
| Junco Novo   | 1.200                            | REG                       | 100% para Junco Novo Ltda.                           | Capela - SE           |

Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível, localizadas na região Nordeste do Brasil (2015).

(continuação)

| <b>Usina</b>         | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>Destino da Energia</b> | <b>Proprietário</b>                                                            | <b>Município</b>        |
|----------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| São José do Pinheiro | 14.700                           | PIE                       | 100% para Usina São José do Pinheiro Ltda                                      | Laranjeiras – SE        |
| Comvap               | 8.800                            | APE                       | 100% para Comvap Açúcar e Alcool Ltda.                                         | União - PI              |
| Pindorama            | 4.000                            | REG                       | 100% para Cooperativa de Colonização Agropecuária e Industrial Pindorama Ltda. | Coruripe – AL           |
| Porto Alegre         | 2.400                            | REG                       | 100% para Destilaria Autônoma Porto Alegre Ltda.                               | Colônia Leopoldina – AL |
| BEN Bioenergia       | 53.000                           | PIE                       | 100% para Bioenergia Geração e Comercialização de Energia do Nordeste S.A      | Teotônio Vilela - AL    |
| Tabu                 | 8.400                            | APE                       | 100% para Agro Industrial Tabu S.A.                                            | Caaporã - PB            |

Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível, localizadas na região Nordeste do Brasil (2015).

(continuação)

| <b>Usina</b>           | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>Destino da Energia</b> | <b>Proprietário</b>                                 | <b>Município</b>             |
|------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|
| Bom Jesus              | 3.200                            | REG                       | 100% para Usina Bom Jesus S.A.                      | Cabo de Santo Agostinho – PE |
| Vitória                | 4.225                            | REG                       | 100% para Norte e Sul Energia Ltda                  | Palmares - PE                |
| Salgado                | 3.600                            | REG                       | 100% para Usina Salgado S.A                         | Ipojuca - PE                 |
| Campo Lindo            | 25.000                           | PIE                       | 100% para Agro Industrial Campo Lindo Ltda          | Nossa Senhora das Dores – SE |
| Taquari                | 8.000                            | PIE                       | 100% para Agro Industrial Capela Ltda               | Capela - SE                  |
| Energética Itajubara   | 4.400                            | REG                       | 100% para Itajubara S/A Açúcar e Álcool             | Coelho Neto – MA             |
| União                  | 10.000                           | PIE                       | 100% para Termelétrica União Ltda                   | Primavera – PE               |
| Santa Maria Açucareira | 4.600                            | REG                       | 100% para Central Açucareira Usina Santa Maria S/A. | Porto Calvo – AL             |

Tabela 9 – Usinas que utilizam resíduos da cana-de-açúcar como combustível, localizadas na região Nordeste do Brasil (2015).

(conclusão)

| Usina          | Potência Fiscalizada (kW) | Destino da Energia | Proprietário                                             | Município                    |
|----------------|---------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|
| Bioflex Caeté  | 30.700                    | PIE                | 100% para Comp. Energética de São Miguel dos Campos S.A. | São Miguel dos Campos – AL   |
| Cepasa         | 5.000                     | REG                | 100% para Celulose e Papel de Pernambuco S.A.            | Jaboatão dos Guararapes – PE |
| <b>Japungu</b> | <b>16.800</b>             | <b>PIE</b>         | <b>100% para Japungu Agroindustrial S/A</b>              | <b>Santa Rita – PB</b>       |
| Iolando Leite  | 8.000                     | PIE                | 100% para Usina Termo Elétrica Iolando Leite Ltda        | Capela - SE                  |
| Pirapama       | 25.000                    | PIE                | 100% para Pirapama Bioenergia Ltda.                      | Vitória de Santo Antão – PE  |
| São Miguel     | 13.200                    | PIE                | 100% para São Miguel - Central Geradora de Energia Ltda. | São Miguel dos Campos – AL   |
| Laranjeiras    | 4.825                     | REG                | 100% para Usivale Ind. e Comércio Ltda.                  | Vicência - PE                |

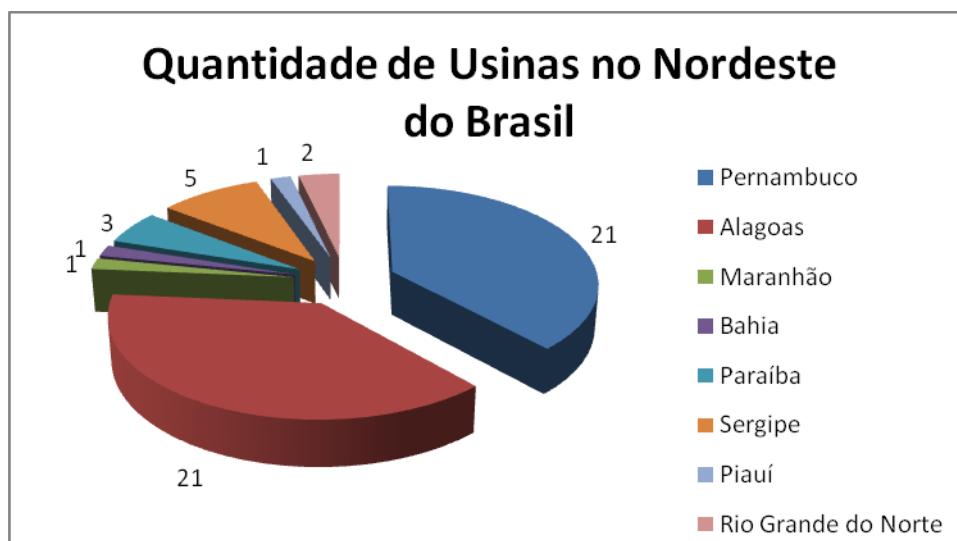
Fonte: Adaptado de ANEEL (2015).

Atualmente o número de usinas sucroalcooleiras no Brasil diminuiu, mas a dificuldade da venda de energia para a rede elétrica persiste. Buscando quebrar esse

paradigma, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou valor total das cotas para custeio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), em 2015. O investimento será de R\$ 2,6 bilhões e busca aumentar a participação de fontes alternativas renováveis (pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e empreendimentos termelétricos a biomassa) na produção de energia elétrica (GESSULLI AGRIBUSINESS, 2014).

A maioria das usinas do nordeste que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como combustível para cogeração se localizam no estado de Alagoas e Pernambuco, Figura 12.

Figura 12 – Usinas localizadas no nordeste do Brasil que utilizam a cogeração em 2015.



Fonte: adaptado ANEEL (2015).

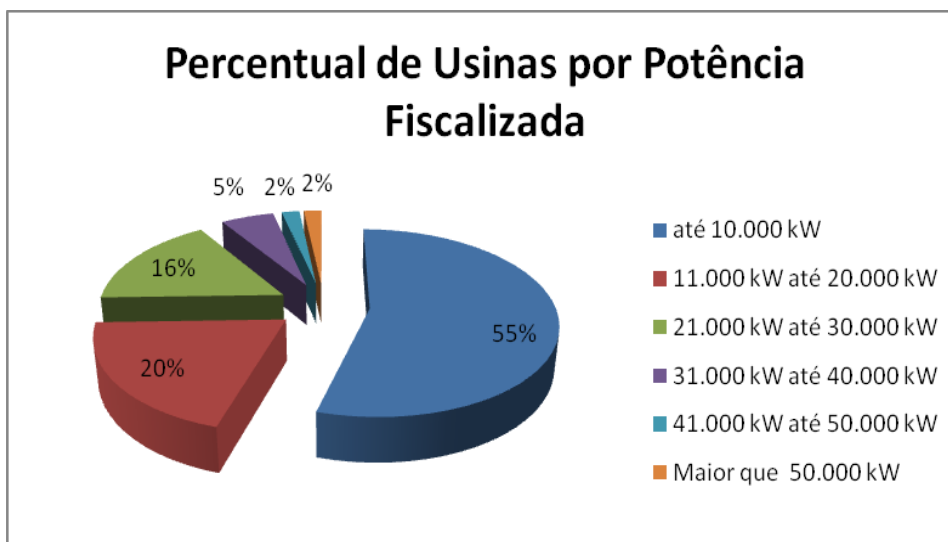
No século XVI os portugueses iniciaram o processo de colonização chamado *plantation* que visava substituir o extrativismo do pau Brasil e de outros produtos de menor valor. A *plantation* iniciada em Pernambuco foi dedicada à cana-de-açúcar (ANDRADE, 2001).

O estado de Pernambuco liderou a produção nacional de açúcar até meados do século XX, quando foi ultrapassada por São Paulo e Alagoas. A seca de 1993 a 1994 e 1998 a 1999 influenciaram o declínio da produção de cana-de-açúcar do estado de Pernambuco, além da dificuldade de competir com os custos de produção de outras regiões, como o centro-sul (ANDRADE, 2001).

Conforme apresentado na Figura 13, as usinas do nordeste ainda apresentam potência baixa diante do seu potencial, das 55 usinas localizadas no nordeste 30 tem no

máximo 10000 kW. A usina que apresenta maior potência do nordeste, 53000 kW está localizada no município de Teotônio Vilela, no estado de Alagoas, Brasil.

Figura 13 – Quantitativo das usinas no nordeste brasileiro com potência fiscalizada em 2015.



Fonte: adaptado ANEEL (2015).

O estado da Paraíba estudo de caso da pesquisa possui três usinas que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como combustível a ser queimado na caldeira. As usinas estão localizadas nos municípios de Santa Rita, Pedras de Fogo e Caaporã.

#### 4.2 Estudo de caso: Japungú Agroindustrial S/A

Nessa seção são apresentadas as instalações da usina, da plantação da cana até o processo de cogeração. Não será apresentado o processo produtivo da destilaria por não ser o foco deste trabalho.

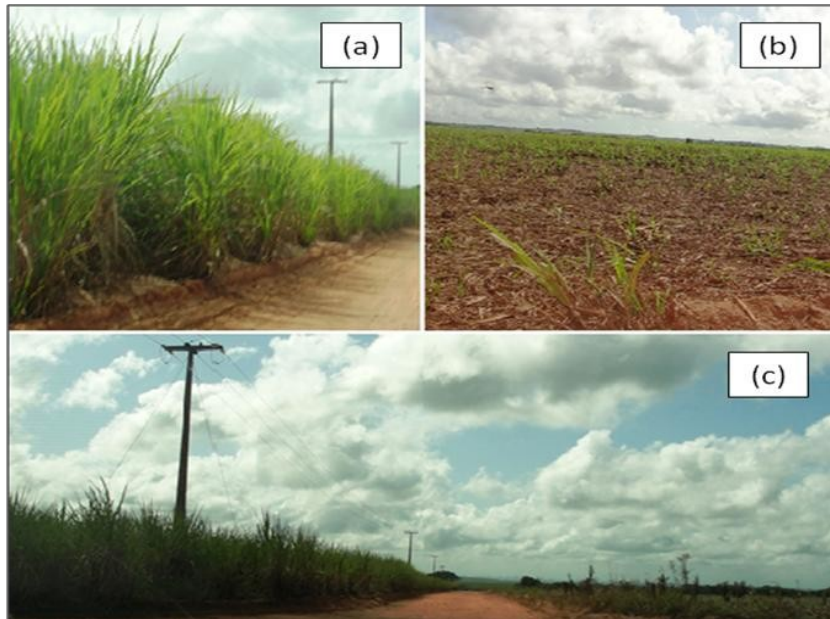
A destilaria Japungú produz álcool a partir da cana-de-açúcar gerando como resíduo do seu processo industrial grande quantidade de bagaço da cana. Parte do bagaço gerado é utilizado na alimentação da caldeira e o restante é vendido para fazer cama de galinha e para alimentar o gado em época de estiagem.

Quanto aos aspectos técnicos a usina utiliza o processo de conversão bioquímica, o bagaço é um resíduo orgânico submetido ao processo de conversão de combustão direta, tendo como energético o calor. O tipo de fornalha utilizada é de leito fixo com grelha basculante.

O bagaço é queimado com 50% de umidade, não ultrapassando os 60% para ser viável a queima. Não é utilizado pré-tratamento da biomassa, a exposição a seu aberto do bagaço ao sol já é suficiente, devido ao clima quente da Paraíba

A estrada de acesso a Usina Japungú passa por dentro da plantação de cana-de-açúcar, sendo possível observar os diferentes estágios da cultura (Figura 14 (c)). No período da safra ocorre a colheita e moagem da cana, já no período “entresafra” a cana é plantada (Figura 14 (b)) e ocorre a formação dos canaviais (Figura 14 (a)).

Figura 14 – Estrada de acesso a Usina Japungú.



Fonte: SANTIAGO (2015).

Na usina Japungú o transporte da cana-de-açúcar costuma ser realizado por dois tipos de caminhões de acordo com a cana a ser transportada. O caminhão chamado gaiola (Figura 15 (d,e)) transporta a cana colhida manualmente, já o caminhão denominado baú faz o transporte da cana da colheita mecanizada (Figura 16 (f,g)).

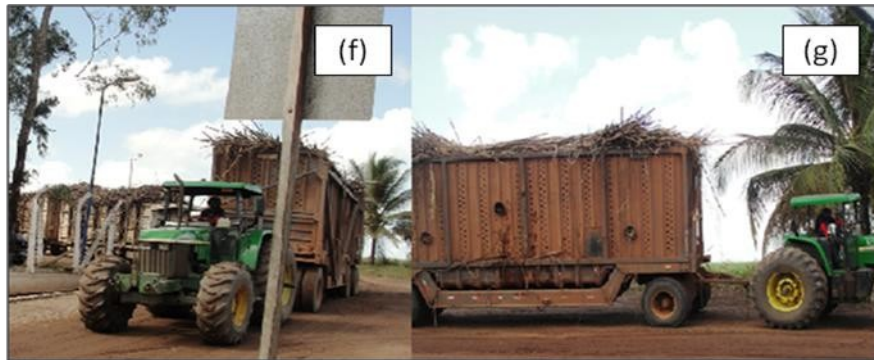
Figura 15 – Gaiola carregada de cana-de-açúcar na estrada de acesso à Usina Japungú.



Fonte: SANTIAGO (2015).

Na Figura 16 observa-se um baú, carregado de cana-de-açúcar, entrando da destilaria Japungú.

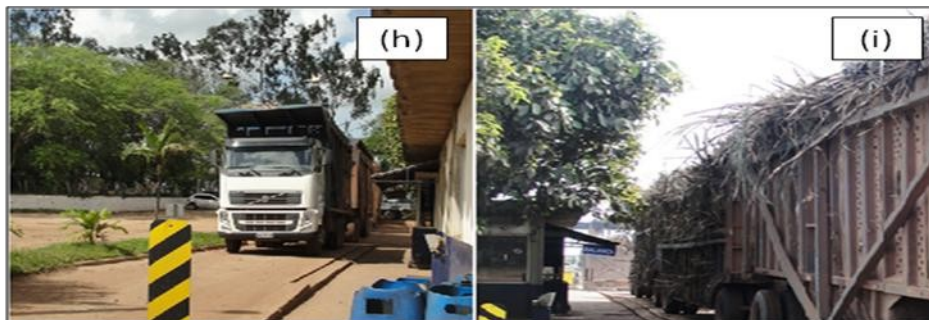
Figura 16 – Baú carregado de cana-de-açúcar.



Fonte: SANTIAGO (2015).

Os caminhões passam por uma balança, na entrada da destilaria, onde é realizada a pesagem (Figura 17).

Figura 17 – Gaiola na balança para a pesagem.



Fonte: SANTIAGO (2015).

Após passar da pesagem os caminhões seguem para amostragem onde a máquina de sondagem coleta uma amostra para ser analisada no laboratório. O motorista espera autorização para posicionar o caminhão no local adequado para a amostragem (Figura 18 (j)), quando autorizado a sonda recolhe o material (Figura 18 (k)).

Figura 18 – Sonda de amostragem.



Fonte: SANTIAGO (2015).

A amostra de cana-de-açúcar coletada pela sonda é encaminhada para a forrageira (Figura 19 (l)), máquina que tritura a cana-de-açúcar para posterior análise no laboratório (Figura 19 (m)). No laboratório a cana é pesada e compactada (figura 19 (m)). O caldo resultante da compactação é analisado para verificar o teor de açúcar presente. O preço pago pela cana é proporcional ao açúcar presente. Quanto maior for o teor de açúcar na amostra mais elevado o preço da matéria prima.

Figura 19 – Forrageira (l) e laboratório (m).



Fonte: SANTIAGO (2015).

Os caminhões carregados depositam a cana-de-açúcar no solo, onde um gancho leva a cana até a máquina onde a cana será lavada para retirar as impurezas visando obter maior eficiência na queima (Figura 20).

Figura 20 – Transporte da cana-de-açúcar (n) para a lavagem (o).



Fonte: SANTIAGO (2015).

Após a recepção (Figura 21 (p)) a cana-de-açúcar é posta na mesa alimentadora (Figura 21 (q)), uma esteira de borracha que leva a cama para continuidade do preparo para moagem.

Figura 21 – Vista da recepção da cana-de-açúcar.



Fonte: SANTIAGO (2015).

Embora a cana-de-açúcar tenha sido lavada há a possibilidade de conter algumas impurezas, então antes da moagem passa por uma esteira de metal que possui um imã para retirar restos de metais ainda presentes, conforme pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 – Mesa alimentadora (r) e esteira de metálica (s).



Fonte: SANTIAGO (2015).

O centro de moagem é composto por quatro ternos de moendas entre os quais estão as esteiras intermediárias (Figura 23). A cana-de-açúcar é prensada para a retirada do caldo que será encaminhado a destilaria para a produção de álcool.

Figura 23 – Ternos de moenda (t) e esteiras intermediárias (u).



Fonte: SANTIAGO (2015).

Depois que a cana-de-açúcar passa pelos quatros ternos de moenda (Figura 24), resta apenas o bagaço que é encaminhado, com aproximadamente 50% de umidade, ao depósito através de uma esteira-tapete (Figura 24 (w)).

Figura 24 – Quarta esteira intermediária com bagaço (v) e tapete (w).



Fonte: SANTIAGO (2015).

O sistema de geração de vapor da Usina Japungú possui uma caldeira com pressão de trabalho de  $42 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , podendo produzir até 100 toneladas de vapor por hora. A única fonte de biomassa que alimenta a caldeira é o bagaço gerado pela própria usina. A caldeira possui duas entradas de ar (ar primário e ar secundário), ambos pré-aquecidos antes de serem injetados na caldeira.

No sistema de produção de vapor da usina Japungu o bagaço sai da moenda com umidade de, aproximadamente, 50% e é transferido por meio de esteiras até os dosadores. Os dosadores alimentam a caldeira, onde o bagaço é queimado, aquecendo a água e produzindo vapor. Na Figura 25 temos a vista frontal da caldeira e sua respectiva chaminé.

Figura 25 – Vista frontal da caldeira (x) e vista da chaminé da caldeira (y).



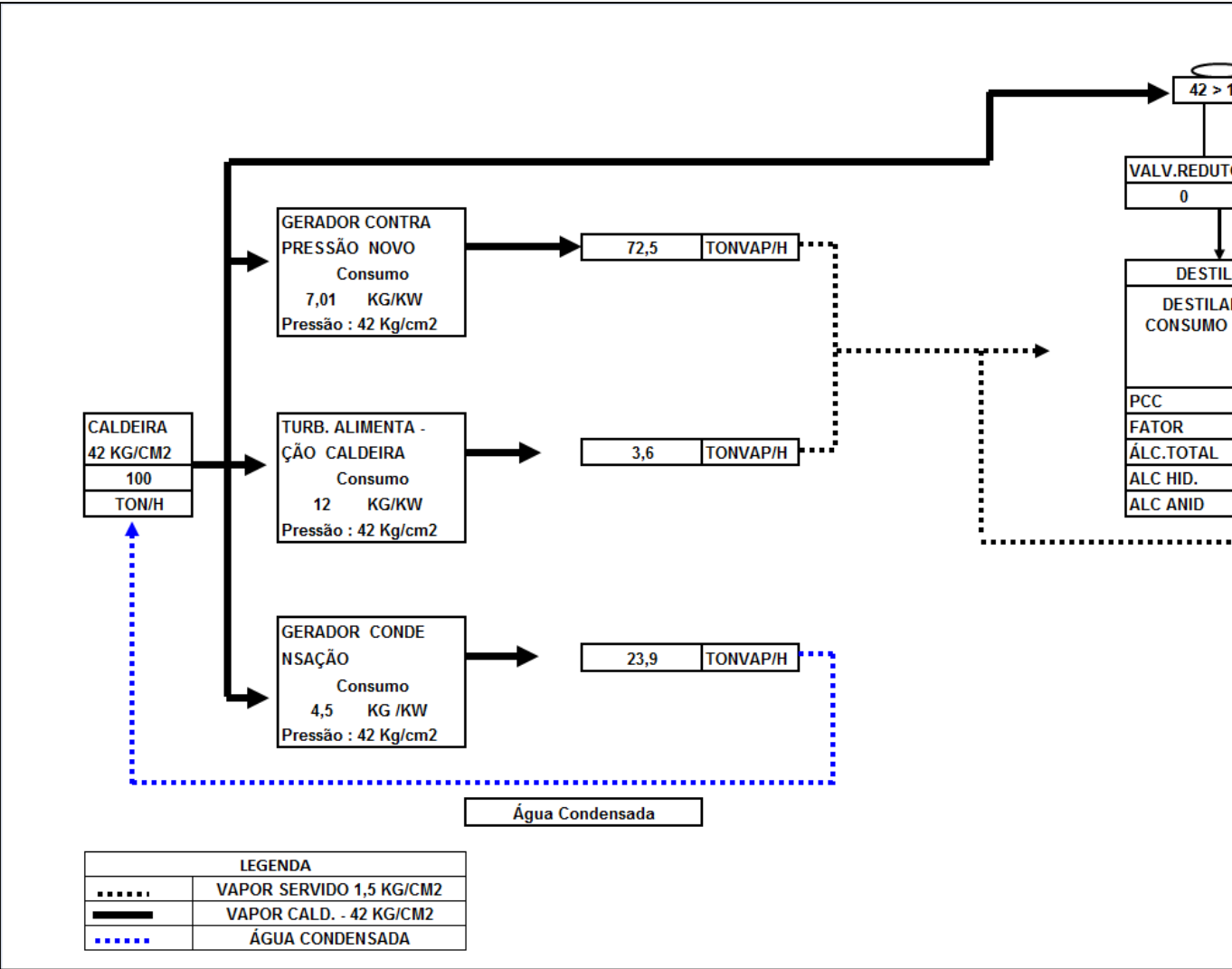
Fonte: SANTIAGO (2015).

O vapor produzido na caldeira é de alta pressão, sendo utilizado para movimentar as turbinas de processo, as turbinas para geração de energia e turbo bomba de alimentação de água da caldeira. Em seguida o vapor de baixa pressão que sai dessas turbinas é enviado por meio de uma rede de distribuição a diferentes equipamentos do processo de fabricação de álcool, conforme observa-se na Figura 26.

O gerador de condensação, apresentado na Figura 27, produz 23,9 tonelada de vapor por hora, porém não envia vapor para o processo, a água condensada volta para a caldeira.

A água, o vapor condensado no processo e parte do vapor de baixa pressão passa por um desaerador térmico antes de alimentar a caldeira. O desaerador elimina o oxigênio do condensado e outros gases incondensáveis, reduzindo a corrosão e elevando a temperatura da água de alimentação da caldeira (INNOCENTE, 2011).

Figura 26 – Fluxograma de vapor da usina Japungú.



Fonte: Dados da pesquisa.

No início dessa pesquisa a empresa utilizava gerador de contra pressão que produzia 52,8 toneladas de vapor por hora, com pressão de operação máxima de  $30 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , Como a caldeira opera com pressão de trabalho de  $42 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , era necessário utilizar uma válvula redutora, ou seja, havia uma perda no processo que poderia ser solucionada com a compra de um novo gerador.

No final de 2014 a usina optou pelo investimento e comprou um novo gerador contra pressão com  $42 \text{ kg.cm}^{-2}$  e 7,01 kg de vapor por 1 kW de energia, eliminando assim o uso da válvula redutora. Com o novo gerador de contra pressão a produção no gerador passou de 52,8 para 72,5 tonelada de vapor por hora.

Como na época da implantação das usinas de cana-de-açúcar, a queima da biomassa não tinha como objetivo principal a geração de energia elétrica, a maioria das usinas utiliza processos que possuem baixo rendimento (MENEGUELLO, 2006).

Atualmente, na busca por desenvolvimento de mecanismos limpos para geração de energia, a bioeletricidade se torna atraente. Segundo Meneguello (2006) as usinas devem investir alto em modernização do seu parque industrial para que possam aumentar sua produtividade na geração de energia elétrica (MENEGUELLO, 2006). Mais adiante, quando falarmos na geração de eletricidade da usina Japungú será expostos os ganhos reais com o investimento.

Na Figura 27 o equipamento cinza mais a frente é a turbina de condensação e o equipamento azul ao fundo é o gerador.

Figura 27 – Turbogenerador de condensação da usina Japungú.



Fonte: SANTIAGO (2015).

### 4.3 Cálculos do balanço mássico

Para analisar a eficiência em um forno é necessário determinar as massas envolvidas. Acima foi apresentado o fluxo de água e vapor da usina, construído em cima dos dados reais. Nessa seção será apresentado o cálculo do balanço de massa da combustão levando em consideração os insumos necessários e os resíduos gerados na cogeração.

Como entrada de material temos o ar atmosférico (comburente), composto por oxigênio e nitrogênio, e a biomassa (combustível), no caso dessa pesquisa é o bagaço da cana-de-açúcar.

Como saídas temos o produto final (vapor), os produtos da combustão ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{H}_2$ , cinzas, material particulado), e a perda de calor ou de produto não consumidos durante o processo de combustão.

Os dados foram obtidos com a aplicação das equações explanadas na metodologia desse trabalho.

#### 4.3.1 Ar necessário para combustão do bagaço na Usina Japungú

Quanto aos insumos necessários para geração de vapor temos como combustível o bagaço e como comburente o ar. A quantidade de bagaço consumida pela caldeira é de 48 toneladas por hora. Para identificar a quantidade ideal de ar atmosférico a ser utilizada é preciso conhecer a análise imediata e elementar da biomassa. Nesse estudo foram utilizados dados de Castro (2009) apresentados nas tabelas x e y.

A caldeira da usina Japungú possui capacidade para produzir 100 toneladas de vapor por hora, para alimentar a caldeira são consumidos 48ton/h de bagaço.

O vapor superaquecido sai da caldeira com temperatura igual a  $450^\circ\text{C}$  e pressão igual a  $40,63 \text{ kgf/cm}^2$ . Tendo em vista que  $1 \text{ kgf/cm}^2$  corresponde a  $0,9807 \text{ bar}$ , temos a pressão aproximada de 40 bar para o estudo de caso. Com o dado da temperatura e pressão, consultou-se tabela termodinâmica de vapor para obter a entalpia específica do vapor ( $\text{kJ/kgvapor}$ ).

Multiplicando a capacidade de produção de vapor pela entalpia específica do vapor, com base nos dados de temperatura e pressão, temos a potência do vapor de 92501 kJ/s.

Considerando um rendimento de 75%, encontra-se a potência térmica utilizando a equação 3, a saber: 123,33 MW térmico. Segundo Lopes (2009) o Poder Calorífico Inferior do

bagaço da cana-de-açúcar, com umidade de 50%, em base tal qual é  $1801 \text{ kcal/kg}$ , que equivale a  $15 \text{ MJ/kg}_{\text{bs}}$ . Aplicando a potência térmica e o PCI na equação 2, temos que a vazão da biomassa é  $8,22 \text{ kg}$  de biomassa em base seca por segundo ou  $29,6$  toneladas por hora.

Aplicando equação 4 e tendo por base os dados da Tabela 4, o valor de oxigênio estequiométrico para combustão é  $0,038 \text{ kmol}$  por  $\text{kg}$  de biomassa.

A usina Japungú opera com 60% de excesso de ar, ou seja, possui razão estequiométrica igual a 1,6. Multiplicando o valor do oxigênio estequiométrico pela razão estequiométrica, temos que o oxigênio total necessário para a combustão é  $0,061 \text{ kmol O}_2/\text{kg}$  biomassa bs.

Com base no valor do oxigênio estequiométrico, encontramos o ar estequiométrico para a combustão de  $0,184 \text{ kmol}$  por  $\text{kg}$  de biomassa, aplicando a equação dos gases ideais, temos  $4,125 \text{ Nm}^3$  de ar por  $\text{kg}$  de biomassa em base seca.

Aplicando a equação 5, temos que o ar total para combustão do bagaço é  $6,6 \text{ Nm}^3$  de ar por  $\text{kg}$  de biomassa em base seca.

Com a vazão mássica da biomassa e o valor do ar total necessário para combustão completa da biomassa, aplicando a equação 1, encontramos a vazão de ar necessária para alimentar a fornalha, a saber:  $69,37 \text{ kg}$  de ar por segundo.

Portanto, os insumos são  $48$  toneladas de bagaço por hora e  $249,7$  toneladas de ar por hora. Tendo em consideração a capacidade de produção de vapor da caldeira, temos que a quantidade de água necessária para alimentar a caldeira é  $100$  toneladas por hora.

Tendo encontrado os insumos, nessa seção será calculado os resíduos gerados durante o processo de combustão. Para efeito de cálculo, consideramos a eficiência de conversão de carbono igual a 95%.

#### ***4.3.2 Produtos da combustão na fase sólida***

Após a queima do bagaço tem-se produtos da combustão na fase sólida e na fase gasosos. Os produtos sólidos são escórias, carbono inqueimado e volantes. O carbono inqueimado consiste na parte do carbono, presente na biomassa, que não foi queimado durante a combustão por motivos como pouco tempo de exposição, falta de comburente ou falhas técnicas do próprio equipamento.

Considerando a eficiência de conversão de carbono igual a 95%, aplica-se a equação 6, e obtemos o valor de  $0,0226 \text{ kg}$  de carbono inqueimado por  $\text{kg}$  de biomassa em base seca.

Portanto, os produtos sólidos da combustão é o resultado da soma do carbono inqueimado e as cinzas. Aplicando equação 7, obtemos como resultado 0,0966 kg de produtos sólidos por kg de biomassa em base seca.

Considerando 50% de produtos sólidos presente como volantes nos produtos da combustão, temos que o volante produzido é 0,0483 kg de produto volante em base seca por kg de combustível em base seca.

Como 50% dos produtos produzidos são volantes, então a percentagem de escória também será de 50%. Portanto, a quantidade de escória produzida será de 0,0483 kg escória em base seca por kg de combustível em base seca.

Diante dos dados obtidos, na próxima seção iremos calcular os resíduos gerados na fase gasosa.

#### ***4.3.3 Produtos da combustão na fase gasosa***

Os produtos da combustão na fase gasosa podem ser identificados aplicando as equações 1.8, 1.9, 1.10, 1.11 e 1.12. A produção de gases úmidos durante o processo de combustão é dada em kmol de gases úmidos por kg de biomassa em base seca de cada elemento (Tabela 10).

Tabela 10 - Quantidade (kmol) de gases húmidos produzidos por quilograma de combustível.

| <b>kmol de gases húmidos por<br/>kg de combustível bs</b> |         |
|-----------------------------------------------------------|---------|
| CO <sub>2</sub>                                           | 0,03574 |
| nH <sub>2</sub> O                                         | 0,0872  |
| CO                                                        | 0       |
| H <sub>2</sub>                                            | 0       |
| O <sub>2</sub>                                            | 0,02472 |
| N <sub>2</sub>                                            | 0,22909 |
| NO                                                        | 0       |
| SO <sub>2</sub>                                           | 0,00001 |

Fonte: Dados da pesquisa.

Os totais de gases úmidos e secos produzidos durante a combustão da biomassa foram respectivamente:

- $G_t = 0,37677$  kmol de gases úmidos por kg de biomassa em base seca (equação 13).
- $G_{t,s} = 0,28977$  kmol de gases secos por kg de biomassa em base seca (equação 15).

A percentagem de cada elemento presente no gás de exaustão foi calculada através da aplicação das equações 1.14 (gás úmido) e 1.16 (gás seco). A tabela 11 apresenta as percentagens dadas em gases úmidos e secos.

Tabela 11 - Percentagem de gases produzidos durante a combustão por quilograma de combustível.

|                  | kmoles de gases de combustão úmidos por kg de combustível bs | kmoles de gases de combustão secos por kg de combustível bs |
|------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 9,5                                                          | 12,3                                                        |
| H <sub>2</sub> O | 23,1                                                         | -                                                           |
| CO               | 0,0                                                          | 0                                                           |
| H <sub>2</sub>   | 0,0                                                          | 0                                                           |
| O <sub>2</sub>   | 6,6                                                          | 8,5                                                         |
| N <sub>2</sub>   | 60,8                                                         | 79,1                                                        |
| NO               | 0,0                                                          | 0                                                           |
| SO <sub>2</sub>  | 0,0017                                                       | 0,0022                                                      |
| <b>Total</b>     | <b>100,0</b>                                                 | <b>100</b>                                                  |

Fonte: Dados da pesquisa.

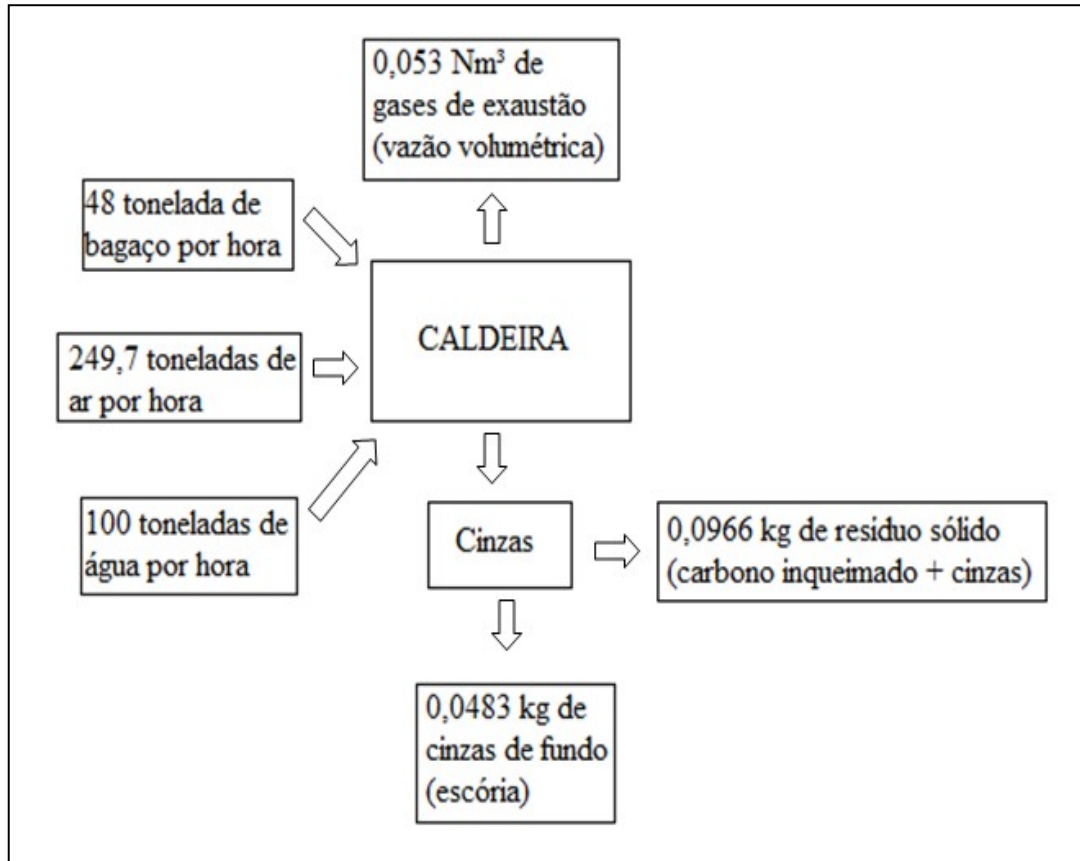
A quantidade de gases produzida por mol pode ser obtida utilizando a equação 18. Ressalta-se que foram utilizadas as percentagens dadas em kmoles de gases seco por biomassa em base seca. Portanto, o valor obtido foi de 30,27 kg de gases por kmol de gases.

Aplicando a equação 17 temos que a vazão mássica dos gases na exaustão foi de 72 kg de gases por segundo.

Diante dos dados obtidos, aplicando a equação dos gases ideais, equação 19, temos que a vazão volumétrica dos gases de exaustão da usina Japungú é 0,053 N<sup>3</sup> por segundo.

Na Figura 28 temos o resumo de todos os dados de insumos e resíduos obtidos nesse trabalho, se o sistema fosse perfeito.

Figura 28 – Fluxograma dos insumos e resíduos da caldeira da usina Japungú.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores expostos no fluxograma são equivalente a uma hora, o que observa-se que ao longo de apenas um dia os valores são elevados. Entretanto, o bagaço era um resíduo que adquiriu valor, a parte da água utilizada é a água condensada que retornou do processo produtivo, os gases de exaustão estão dentro do limite permitido pela legislação brasileira. Quanto às cinzas, existem diversos estudo que apresentam possíveis destinos ambientalmente corretos, como a incorporação no cimento.

#### 4.4 Cogeração de energia da Usina Japungú

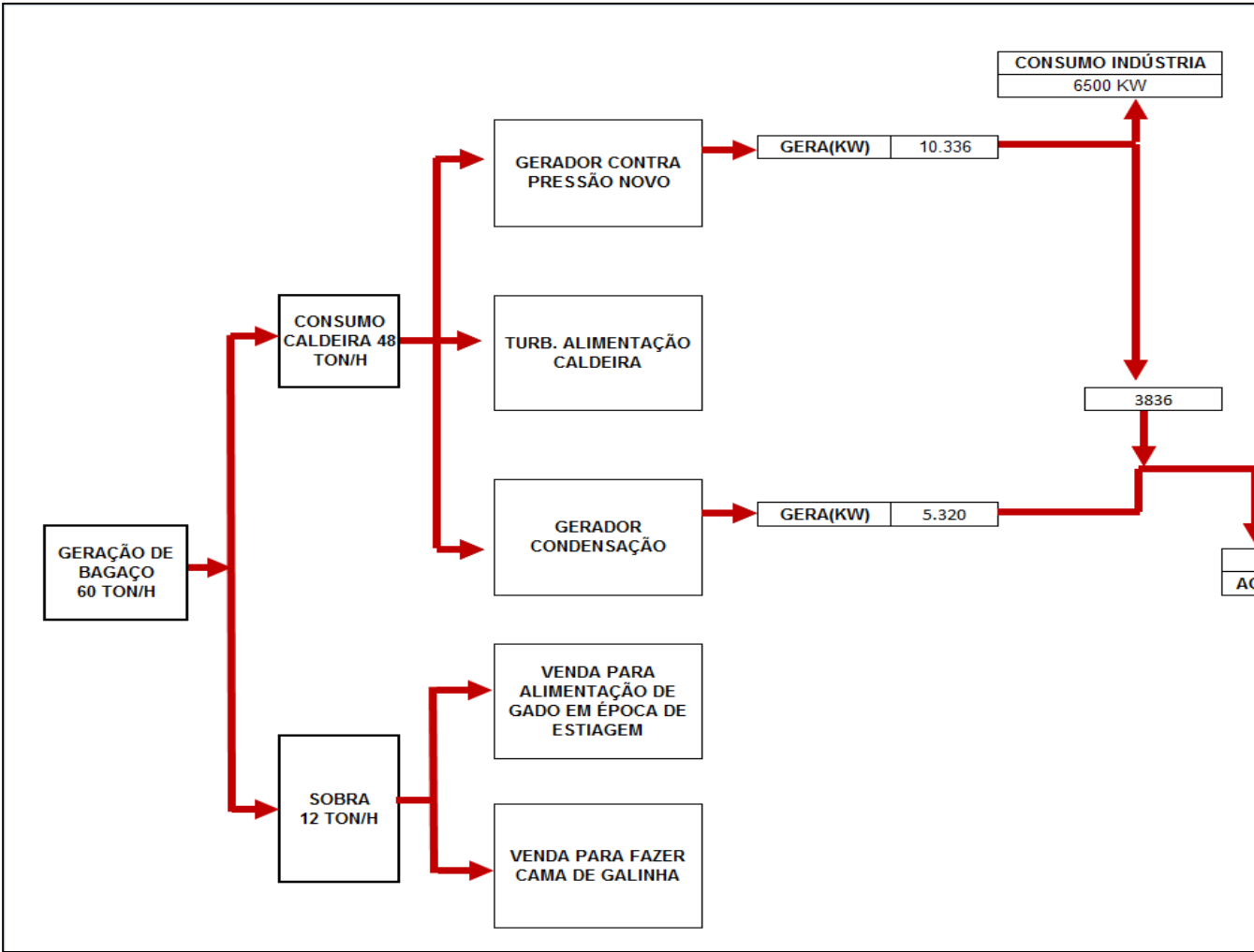
Quando o processo é otimizado (equipamentos eficientes, quantidade ideal de insumos, destino correto dos resíduos, utilização de mecanismos como créditos de carbono), o potencial energético da biomassa da cana-de-açúcar torna-se elevado e conseqüentemente sua valorização.

Soares e Rossell (2006) afirmam que a biomassa da cana-de-açúcar pode ser transformada quase totalmente em energia: 1000kg de cana limpa corresponde a 1.718.000kcal, essa energia é subdividida em 153kg de açúcar (608.000kcal), 276kg de bagaço (598.000kcal) e 165kg de palha (512.000kcal).

Os autores ainda compararam o conteúdo energético de uma tonelada de cana com o potencial energético de um barril de petróleo e concluíram que uma tonelada de cana equivale energeticamente a 1,24 barris de petróleo bruto.

A usina Japungu gera durante seu processo produtivo elevada quantidade de bagaço. Por hora são produzidos 60 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, ou seja, 1.440 toneladas de bagaço por dia. Na Figura 29 é apresentado o fluxograma através do qual se observa os fluxos de bagaço e energia gerada e utilizada pela usina Japungu.

Figura 29 – Fluxograma da geração e distribuição de energia elétrica pela combustão do bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Dados da pesquisa.

Das 60 ton/h produzidas de bagaço, 48 ton/h são consumidas na própria usina para alimentação da caldeira, gerando 15,657 MW por hora. A energia elétrica produzida na cogeração é utilizada conforme indicado na Figura 29.

Porém ainda há uma sobra de 12 toneladas por hora de bagaço, ou seja, 297 tonelada de bagaço por dia. Outro destino final economicamente e ambientalmente viável é a venda do bagaço. Atualmente o preço da tonelada de bagaço é em média 90 reais. Portanto, com a venda do bagaço que não é utilizado na cogeração, a usina pode ganhar 26.742,86 reais por dia, e 5.616.000,00 reais por safra, considerando que a safra possui 210 dia.

Os valores poderiam ser ainda maiores se a usina utiliza-se a palha também para cogeração, o aproveitamento da palha, como fonte de energia, resultaria em significativos ganhos energéticos para o setor, além do bem ambiental. A dificuldade que algumas usinas enfrentam para inserir a palha no processo de cogeração é o custo para adaptar os equipamentos.

É importante salientar que há uma pequena variação na quantidade de bagaço que alimenta a caldeira, devido às condições do forno, pois se trata de um sistema com perdas e não um sistema perfeito. Portanto, os dados acima são uma média, logo, se for inserido no forno uma quantidade menor de bagaço, a quantidade de vapor e consequentemente geração de energia elétrica também será inferior.

Com a aquisição do novo gerador a usina Japungu teve que realizar um investimento que permitirá a geração de energia para venda. A tabela 12 apresenta os ganhos com energia elétrica da usina Japungú com o gerador novo.

Tabela 12 – Energia gerada, distribuída e vendida da usina Japungú, com antigo e novo gerador.

| <b>Ganhos com energia elétrica</b> |                      |                                 |
|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|
|                                    | <b>Posição atual</b> | <b>Posição com gerador novo</b> |
| Energia máxima gerada em kW        | 11.231               | 14.982                          |
| Consumo na indústria em kW         | 6.500                | 6.500                           |
| Energia de agroval em kW           | 400                  | 400                             |
| Irrigação máxima em kW             | 4.639                | 8.334                           |
| Meta para irrigação em kW          | 4.639                | 6.000                           |
| Energia para venda em kW           | -                    | 2.334                           |
| Energia para vender em mW / mês    |                      | 1.680                           |
| Energia para vender mW / safra     |                      | 12.878                          |

Fonte: Dados da pesquisa.

Antes não havia a venda de eletricidade para a rede, porém com o gerador novo pode-se escolher essa opção quando for viável, antes, porém é necessário analisar o melhor retorno financeiro, se é vender bagaço ou vender energia elétrica.

Admitindo que para gerar 1 MW de energia elétrica seja necessário 2,1 toneladas de bagaço e que o preço da energia seja 192,86 reais por MW gerado e o bagaço custe 90 reais por tonelada, temos um equilíbrio em relação ao lucro, sem considerar as despesas a ser cobrada pela concessionária.

Meneguello (2006) realizou pesquisa com consulta direta nas usinas de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, Brasil, e concluiu que há um grande interesse das empresas do setor sucroalcooleiro pela produção comercial de energia elétrica e que oportunidades como o mercado de créditos de carbono podem aumentar a participação da biomassa da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira.

Segundo Pearce (2002) a produção de energia por meio da queima de combustíveis fósseis provocam o aumento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. A concentração de dióxido de carbono, juntamente com outros gases, tem intensificado o efeito estufa. O efeito estufa é um fenômeno natural, mas quando intensificado tem como consequência o aumento da temperatura global.

O aquecimento global tem provocado mudanças climáticas cada vez mais intensas causando sérios riscos às populações. Os principais gases causadores do efeito estufa são dióxido de carbono, clorocarbono, metano e óxido nitroso. Embora, o dióxido de carbono não seja o gás mais nocivo, é o que mais contribui para o efeito estufa devido a sua maior concentração na atmosfera (PEARCE, 2002).

Diante dessa problemática a geração de energia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar se apresenta como mecanismo de desenvolvimento limpo, que contribui para combater a intensificação do efeito estufa.

Segundo A United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2006), atualmente, existem no Brasil vários projetos credenciados, ou em fase de credenciamento, para receberem a classificação de mecanismos de desenvolvimento limpo, como usinas termoeletricas a biomassa de cana-de-açúcar.

## 5 CONCLUSÃO

Embora existam muitas fontes alternativas no Brasil, há uma concentração no uso da hidráulica. Esta realidade precisa ser modificada, pois, não é interessante para o Brasil ser dependente de uma única fonte, se faz necessário diversificar a matriz energética brasileira.

Foi identificado que no nordeste brasileiro 55 usinas sucroalcooleira, mas destas a maioria possuem potência inferior a 11.000 kW. As usinas poderiam usufruir mais do potencial do bagaço com investimentos em novas tecnologias de combustão, adaptações técnicas nas caldeiras/fornalhas ou utilização de pré-tratamentos da biomassa.

Com o estudo de caso identificou-se as fragilidades no processo de venda de bioeletricidade para as concessionárias de energia elétrica. Dos 3127 empreendimentos geradores de energia em operação no Brasil, apenas 378 são movidos a biomassa. Dentre as reclamações dos usineiros, destaca-se os transtornos burocráticos dos leilões e o baixo preço oferecido pelo megawatt elétrico.

No caso das usinas identificou-se a geração elevada de bagaço como um problema ambiental que pode ser minimizado com o uso deste na cogeração de energia, que além de ambientalmente viável, possui vantagens econômicas elevadas.

Sabendo que a compra de energia irrigante é mais barata que a energia convencional, a usina poderia diminuir o uso da energia para irrigação visando à venda. Caso a usina Japungu vendesse 4000kw produzidos para irrigação, ainda sobraria 4857kw de energia elétrica para a irrigação. Tendo em vista que cada MW custa 200 reais, a usina ganharia por dia 19200,00 reais. Considerando que uma safra dura 210 dias, o lucro da usina ao final da safra seria de 4.032.000,00 reais.

Vender eletricidade é mais vantajoso quando o valor da eletricidade for superior a 200 reais. Entretanto, quando a empresa opta pela venda de eletricidade pode ser classificada como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), ou seja, pode reduzir os custos e incentivar o desenvolvimento sustentável.

Diante do exposto, conclui-se reconhecendo que é preciso sanar os entraves aqui expostos para que o bagaço possa contribuir mais para matriz energética brasileira, cooperando para minimizar a dependência da energia hidrelétrica e petrolífera.

Para futuros estudos, sugere-se pesquisar o potencial do bagaço para fabricação do etanol de segunda geração, nova tecnologia que acredita-se valorizar ainda mais o bagaço e todo mercado sucroalcooleiro.

## REFERÊNCIAS

ALANNE, K.; SAARI, A. **Sustainable small-scale CHP technologies for buildings: the basis for multi-perspective decision-making**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 8, n. 5, p. 401–431, out. 2004.

AFCAL, Associação dos Fabricantes de Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos. 2010. Disponível em: <[http://www.afcal.pt/destinoFinal\\_valorizacao.php](http://www.afcal.pt/destinoFinal_valorizacao.php)>. Acesso em: 23 de dezembro de 2014.

ANDRADE, M. C. DE. **Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco**. v. 15, n. 43, p. 267–280, 2001.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração**. Matriz energética do Brasil. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2015.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica**. – Brasília : ANEEL, 2002.

BAIRD, Colin. **Tabela Periódica**. Química ambiental. 2º edição. tradução: Maria Angeles Lobo Recio e Luiz Carlos Marques Carrera. Porto Alegre: Bookman, 2002. CDU 54/549:574.2/.9

BRASIL, Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. **Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19991.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19991.htm)>. Acesso em: 17 de março de 2014.

\_\_\_\_\_, Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/LEIS\\_2001/L10295.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm)>. Acesso em: 16 de julho de 2014.

\_\_\_\_\_, LEI Nº 10.438, de 26 de abril de 2002. **Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm)>. Acesso em: 21 de março de 2014.

\_\_\_\_\_, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia** ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília : MME : EPE, 2007. 12 v. : il.

CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. **Matriz energética brasileira é destaque em fórum da ONU, em Nova York**. Disponível em:

<[http://www.cepel.br/cepel\\_noticias/noticia.php?id=476](http://www.cepel.br/cepel_noticias/noticia.php?id=476)>. Acesso em: 16 de junho de 2014.

CONAB, C. N. DE A. **Acompanhamento da Safra Brasileira Cana-de-Açúcar**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 5 de maio de 2014.

CONAMA, **Resolução CONAMA nº 5**. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA\\_RES\\_CONS\\_1989\\_005.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_1989_005.pdf)>. Acesso em: 12 de junho de 2014.

\_\_\_\_\_, **Resolução CONAMA nº 3**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>>. Acesso em: 12 de junho de 2014.

\_\_\_\_\_, **Resolução CONAMA nº 382**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>>. Acesso em: 12 de junho de 2014.

\_\_\_\_\_, **Resolução nº 436**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>>. Acesso em: 16 de julho de 2014.

CONPET, **Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás**. Disponível em: [http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt\\_br/pagina-inicial.shtml](http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/pagina-inicial.shtml)>. Acesso em: 17 de março de 2014.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa. LORA, Electo Eduardo Silva. AYARZA, Juan Arturo Castañeda. **Biomassa no Brasil e no Mundo**. In: Luís Augusto Barbosa Cortez, Electo Eduardo Silva Lora, Edgardo Olivares Gómez. Biomassa para energia. – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. Pg 15-29.

ELETROBRAS, **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Procel**. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/pci/data/Pages/LUMIS09BD1853PTBRIE.htm>>. Acesso em: 17 de março de 2014.

ENERGISA. Tipos de tarifas. Disponível em: <<http://www.energisa.com.br/empresa/paginas/pequenas-e-medias-empresas/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2015.

EPA, Environmental Protection Agency United States. **Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors**. AP 42, Fifth edition, volume I, Chapter 2: Solid waste disposal. Refuse Combustion. 1996. Disponível em:

<<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s01.pdf>>. Acesso em: 09 de junho de 2014.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Disponível em:

<[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2\\_-\\_BEN\\_-\\_Ano\\_Base/1\\_-\\_BEN\\_Portugues\\_-\\_Inglxs\\_-\\_Completo.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-_BEN_-_Ano_Base/1_-_BEN_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf)>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2014.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Disponível em: <

[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2014\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf)>. Acesso em: 27 de janeiro de 2015.

EU,1999. **Biomass Conversion Technologies**. EUR 18029 EN ISBN 92-828-5368-3.

FARRELL, A. E.; GOPAL, A. R. **Bioenergy Research Needs for Heat , Electricity , and Liquid Fuels**. v. 33, n. April, p. 373–380, 2008.

GESSULLI AGRIBUSINESS. Biomassabioenergia. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia da Aneel recebe investimento de R\$ 2,6 bilhões**. Segunda-feira, 15 de Dezembro de 2014, 11:02:20. Biomassa. Disponível em:

<[http://www.biomassabioenergia.com.br/noticia/programa-de-incentivo-as-fontes-alternativas-de-energia-da-aneel-recebe-investimento-de-r-26-bilhoes/20141215110436\\_B\\_212](http://www.biomassabioenergia.com.br/noticia/programa-de-incentivo-as-fontes-alternativas-de-energia-da-aneel-recebe-investimento-de-r-26-bilhoes/20141215110436_B_212)>. Acesso em: 23 de dezembro de 2013.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**. Estud.

av. v.21 n.59. ISSN 0103-401.4 São Paulo jan./abr. 2007. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142007000100003>>. Acesso em: 12 de março de 2014.

GRAUER, A.; KAWANO, M. **Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável**. Revista da Madeira, n. 110, 2008. Disponível em:

<[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1203&subject=Biomassa&title=Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1203&subject=Biomassa&title=Aproveitamento%20de%20res%C3%ADduos%20para%20biomassa%20%C3%A9%20rent%C3%A1vel)>. Acesso em: 12 março de 2014.

GRIMONI, J. A. B.; GALVÃO, L. C. R.; UDAETA, M. E. M. **Iniciação a conceitos de sistemas energéticos para o desenvolvimento limpo**. São Paulo: Ed. da USP, 2004. 308p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estados: Paraíba**. Disponível em:

<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?coduf=25>>. Acesso em: 09 de outubro de 2014.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Biocombustíveis no Brasil: Etanol e Biodiesel**. Série eixos do desenvolvimento brasileiro. Comunicados do Ipea. N°53. 26 de maio de 2010. Disponível em: <

[http://www.novacana.com/pdf/estudos/100526\\_comunicadodoipea\\_53.pdf](http://www.novacana.com/pdf/estudos/100526_comunicadodoipea_53.pdf)>. Acesso em: 23 de dezembro de 2014.

INNOCENTE, Andréia Franco. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar - estudo de caso**. Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”. Faculdade De Ciências Agrônômicas. Campus de Botucatu. Botucatu, SP. 2011.

LOO, S. VAN; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion & co-firing**. London: 2008.

LOURENÇO, A. L. M. **Valorização Energética de Biomassa: Contributo Energético e Ambiental**. Universidade de Aveiro. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Portugal, Aveiro: 2011.

LORA, Electo Eduardo Silva; ZAMPIERI, Marcelo. **Classificação e Balanço Térmico das Fornalhas para a Combustão de Biomassa**. In: Luís Augusto Barbosa Cortez, Electo Eduardo Silva Lora, Edgardo Olivares Gómez. Biomassa para energia. – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. Pg 155 a 178.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Culturas: Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 05 de maio de 2014..

MENEGUELLO, Luiz Augusto. **O setor sucroalcooleiro e a utilização da biomassa da cana-de-açúcar como fonte alternativa de energia**. Centro universitário de Araraquara, UNIARA. Araraquara, São Paulo, 2006.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass**. Bioresource technology, v. 83, n. 1, p. 37–46, maio 2002a.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (Part 2): Conversion technologies**. Bioresource technology, v. 83, n. 1, p. 47–54, maio 2002b.

MULTIRIO. **Revista nós da escola**. Edição nº 51. 2007. Disponível em: <[http://portalmultirio.rio.rj.gov.br/porta/\\_download/cartaz51.pdf](http://portalmultirio.rio.rj.gov.br/porta/_download/cartaz51.pdf)>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2014.

NOVACANA. **Tudo sobre a safra: 2014/2015**. Disponível em: <[http://www.novacana.com/busca/filtro/filtro\\_tag?cat\\_id=Safra%202014/2015#](http://www.novacana.com/busca/filtro/filtro_tag?cat_id=Safra%202014/2015#)>. Acesso em: 05 de maio de 2014a.

NOVACANA. **Em crise, setor de etanol e açúcar procura diversificar produção**. Folha de S. Paulo. 26 Junho 2014 08:23 . Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/etanol/mercado/futuro/crise-etanol-editorial-230614/>>. Acesso em 27 de junho de 2014b.

NOVACANA. **A crise do etanol - Editorial**. Folha de S. Paulo. 23 Junho 2014 08:49. Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/industria/usinas/crise-setor-etanol-acucar-diversificar-producao-260641/>>. Acesso em 27 de junho de 2014c.

NOVACANA. Estudo: A cana-de-açúcar como fonte de energia. Disponível em: <<http://www.novacana.com/estudos/a-cana-de-acucar-como-fonte-de-energia-eletrica-241013/>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2015d.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. **A Dimensão do Setor Sucroenergético Mapeamento e Quantificação da Safra 2013/14**. Ribeirão Preto: 2014.

NUNES, I. H. S. et al. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana- de-açúcar para uso na construção**. p. 39–48, 2008.

PARAÍBA, G. **Lei n.º 4.033 de 20 de dezembro de 1978**. Disponível em: <[http://www.sudema.pb.gov.br/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=1035&Itemid=100032](http://www.sudema.pb.gov.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1035&Itemid=100032)>. Acesso em: 12 jun. 2014.

PEARCE, F. **O aquecimento global. Causas e efeitos de um mundo mais quente**. Publifolha, 1ª edição, 72p. ISBN: 85-7402-380-9. São Paulo, 2002.

PETERS, J. A et al. **Hydrothermal upgrading of biomass to biofuel; studies on some monosaccharide model compounds**. Carbohydrate research, v. 339, n. 10, p. 1717–26, 12 jul. 2004.

PRETO, Elio Veit. MORTOZA, Ladson Lima. **Geração de Energia Elétrica Utilizando Biomassa**. Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília/Df: Agosto – 2010.

SOARES, Paulo Augusto; ROSSELL, Carlos Eduardo Vaz. **O setor sucroalcooleiro e o domínio tecnológico**. Volume 2. Nova Série. 2006. Núcleo de análise interdisciplinar de políticas e estratégia da universidade de São Paulo. Disponível em: <[http://www.novacana.com/pdf/estudos/Livro\\_Naippe\\_Vol2.pdf](http://www.novacana.com/pdf/estudos/Livro_Naippe_Vol2.pdf)>. Acesso em: 23 de dezembro de 2014.

SOUZA, G. N; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. **Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-açúcar**. 2007. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais Bento Gonçalves, Brasil: IBRACON. CD- ROM.

SMILL, V. (1999) **Nitrogen in crop production: an account of global flows**. Global Biochemical Cycles, vol. 13,nº2, pages 647-662, june, 1999.

TARELHO. **Apontamentos da disciplina Conversão de Energias Renováveis. Mestrado em Sistemas Energéticos, 2014**. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

UNFCCC, **United Nations Framework Convention on Climate Change**. Disponível em:<<http://www.unfccc.int/Projects/Validation>>. Acesso em 16/julho/2006.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. **An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter**. Fuel, v. 112, p. 391–449, out. 2013.

VERINGA, H. J. **Advanced techniques for generation of energy from biomass and waste.** p. 1–24, 2000.

YOU, Fengqi; YUE, Dajun; SNYDER, Seth W. **Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges.** Computers and Chemical Engineering. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/compchemeng](http://www.elsevier.com/locate/compchemeng)>. Acesso em: 23 de julho de 2014.

ZHANGA, L.; XU, Chunbao Charles; CHAMPAGNE, P. **Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass.** Energy Conversion and Management. Volume 51, Issue 5, May 2010, Pages 969–982. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0196890409004889/1-s2.0-S0196890409004889-main.pdf?\\_tid=1c433c2a-ec9f-11e3-9936-00000aacb360&acdnat=1401965567\\_88cd386ca3b7ae6a51a7d00f97c9f52f](http://ac.els-cdn.com/S0196890409004889/1-s2.0-S0196890409004889-main.pdf?_tid=1c433c2a-ec9f-11e3-9936-00000aacb360&acdnat=1401965567_88cd386ca3b7ae6a51a7d00f97c9f52f)>. Acesso em: 5 jun. 2014.