

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
UNIVERSIDADE ABERTA DO BRASIL
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
APLICADA AOS PROCESSOS PRODUTIVOS

Juliana Dorneles Pacheco

**ANÁLISE TERMODINÂMICA DO USO ADICIONAL DO PALHIÇO DA
CANA-DE-AÇÚCAR À QUEIMA DO BAGAÇO NO SISTEMA DE
COGERAÇÃO DE UMA USINA SUCROENERGÉTICA**

Foz do Iguaçu, PR
2017

Juliana Dorneles Pacheco

**ANÁLISE TERMODINÂMICA DO USO ADICIONAL DO PALHIÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR À QUEIMA DO BAGAÇO NO SISTEMA DE COGERAÇÃO DE UMA
USINA SUCROENERGÉTICA**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos**.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Dias Mayer

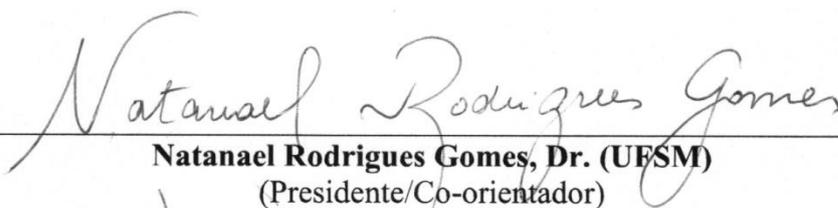
Foz do Iguaçu, PR
2017

Juliana Dorneles Pacheco

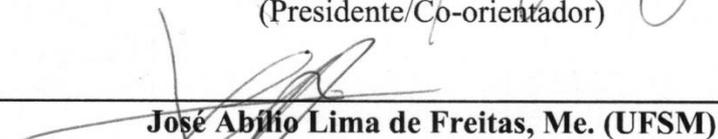
**ANÁLISE TERMODINÂMICA DO USO ADICIONAL DO PALHIÇO DA CANA-DE-
AÇÚCAR À QUEIMA DO BAGAÇO NO SISTEMA DE COGERAÇÃO DE UMA
USINA SUCROENERGÉTICA**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos (EaD), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos**.

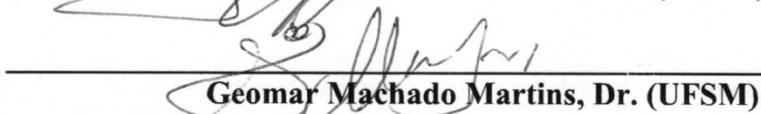
Aprovado em 14 de julho de 2017:



Natanael Rodrigues Gomes, Dr. (UFSM)
(Presidente/Co-orientador)



José Abílio Lima de Freitas, Me. (UFSM)



Geomar Machado Martins, Dr. (UFSM)

Foz do Iguaçu, PR
2017

AGRADECIMENTOS

Exalto a Deus, Senhor maravilhoso que me concedeu o dom da vida e por causa deste, vivo dias lindos.

Agradeço à minha mãe, Maria Tereza, por me ensinar a andar pelos caminhos da justiça e da retidão, e por ser o meu amparo e porto seguro em todos os momentos da minha vida, sobretudo, naqueles em que a caminhada parecia ser solitária.

Ao meu amado filho, João Lucas, que foi a minha maior fonte de inspiração e motivação nos dias de tormenta, e por quem concluo mais uma etapa da minha vida.

Ao meu eterno e amado companheiro, Douglas, que soube compreender os meus dias de ausência para com ele, sendo o meu motivacional frente aos percalços no caminho.

Às minhas irmãs, Mariana e Luiza, pelo auxílio constante e para com as quais encontro razão para caminhar ética e corretamente.

Aos meus amigos, Jéssica, Mateus e Milena, por sempre estarem ao meu lado e com os quais ganho extensas horas de risos.

Ao meu orientador, professor Dr. Flávio Dias Mayer, pelo apoio e compreensão.

Ao corpo docente do Curso de Pós-graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, pelos ensinamentos compartilhados.

A todos minha eterna gratidão!

RESUMO

ANÁLISE TERMODINÂMICA DO USO ADICIONAL DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR À QUEIMA DO BAGAÇO NO SISTEMA DE COGERAÇÃO DE UMA USINA SUCROENERGÉTICA

AUTORA: Juliana Dorneles Pacheco
ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio Dias Mayer

Em uma realidade de potencial crise energética no país e busca de alternativas sustentáveis na geração de energia, a bioeletricidade surge como uma importante solução para este mercado e tem como destaque o setor sucroenergético. O palhiço da cana-de-açúcar aparece como um potencial energético adicional de biomassa combustível além do uso tradicional do bagaço nas centrais de cogeração de energia, em virtude das atuais políticas ambientais aplicadas ao setor sucroenergético, as quais propõem a proibição da prática da queima dos canaviais e resultam em toneladas dessa biomassa deixadas no campo durante a colheita. Neste contexto, este trabalho propõe um estudo investigativo de caráter termodinâmico visando o aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar na geração de excedentes de energia elétrica em uma usina sucroenergética instalada e em operação no município de Dourados, MS, com base nos dados de produtividade da safra 2016/2017. Nas análises foram mantidas as propriedades termodinâmicas para cada volume de controle delimitado, bem como a demanda térmica do processo industrial e o consumo interno de potência elétrica da usina. Os resultados apontam um incremento de 130% na geração de excedentes de energia elétrica com a inserção da queima do palhiço ao bagaço no ciclo de geração a vapor quando comparado com a planta atual. Todavia, houve uma redução considerável na eficiência global do ciclo pela Primeira Lei da Termodinâmica em função da grande vazão de condensado na turbina de extração-condensação. As maiores irreversibilidades nas configurações do sistema de cogeração são evidenciadas nas caldeiras, pelo qual as perdas acontecem desde a liberação de calor pelo combustível no processo de combustão. Avaliando a eficiência global do ciclo pela Segunda Lei, a configuração proposta apresentou um melhor aproveitamento do máximo potencial de exergia disponível dos combustíveis.

Palavras-chave: Bioeletricidade. Cana-de-açúcar. Cogeração. Palhiço. Energia. Exergia.

ABSTRACT

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE SUGARCANE STRAW ADDITION TO THE BAGASSE AS A SUPPLEMENTARY FUEL FOR COGENERATION SYSTEM IN SUGARCANE MILLS

AUTHOR: Juliana Dorneles Pacheco
ADVISOR: Prof. Dr. Flávio Dias Mayer

In a reality of potential energy crisis in the country and search for sustainable alternatives in the generation of energy, bioelectricity emerges as an important solution for this market and has as highlight the sugar-alcohol sector. Sugarcane straw appears as an additional energy potential of biomass fuel in addition to the traditional use of bagasse in power cogeneration plants, due to the current environmental policies applied to the sugar-alcohol sector, which propose the prohibition of the practice of burning of the cane fields and result in tons of this biomass left in the field during harvesting. In this context, this work proposes a thermodynamic research study aiming at the use of sugarcane straw in the generation of surplus electric energy in a sugarcane plant installed and operating in the city of Dourados, MS, based on data from productivity of the 2016/2017 crop. In the analysis the thermodynamic properties were maintained for each control volume delimited, as well as the thermal demand of the industrial process and the internal consumption of electric power of the plant. The results point to a 130% increase in the generation of surplus electric energy with the insertion of burning of the straw to the bagasse in the steam generation cycle when compared to the current plant. However, there was a considerable reduction in overall cycle efficiency by the First Law of Thermodynamics as a function of the large condensate flow in the extraction-condensation turbine. The greatest irreversibilities in the cogeneration system configurations are evidenced in the boilers, whereby losses occur from the release of heat by the fuel in the combustion process. Evaluating the overall efficiency of the cycle by the Second Law, the proposed configuration presented a better use of the maximum available exergy potential of the fuels.

Keywords: Bioelectricity. Sugarcane. Cogeneration. Straw. Energy. Exergy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Capacidade de Geração do Brasil. | 16 |
| Figura 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte. | 17 |
| Figura 3 – Participação das regiões brasileiras na geração de bioeletricidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar. | 18 |
| Figura 4 – Potencial técnico da oferta de bioeletricidade sucroenergética para a rede elétrica. | 19 |
| Figura 5 – Estrutura típica da cana-de-açúcar. | 20 |
| Figura 6 – Prazos para a eliminação da queima do palhiço da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo | 22 |
| Figura 7 – Rotas e operações para o recolhimento do palhiço remanescente no campo. | 27 |
| Figura 8 – Esquema representativo de uma colhedora de cana-de-açúcar picada. | 28 |
| Figura 9 – Sistema de limpeza de cana a seco. | 29 |
| Figura 10 – Enleiramento e recolhimento do palhiço a granel por ancinhos rotativos verticais e colhedora/picadora de forragem autopropelida. | 31 |
| Figura 11 – Recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar através do enfardamento. | 32 |
| Figura 12 – Influência da impureza vegetal no custo total do palhiço. | 34 |
| Figura 13 – Influência da umidade no custo total do palhiço. | 35 |
| Figura 14 – Sistema <i>Topping</i> | 36 |
| Figura 15 – Sistema <i>Bottoming</i> | 36 |
| Figura 16 – Componentes clássicos de uma caldeira aquatubular. | 38 |
| Figura 17 – Sistemas de Potência a Vapor operando com turbinas de extração-condensação. | 39 |
| Figura 18 – Fluxograma do sistema de cogeração instalado na unidade industrial. | 52 |
| Figura 19 – Fluxograma de energia do sistema de cogeração no cenário atual. | 58 |
| Figura 20 – Fluxograma de exergia do sistema de cogeração no cenário atual. | 58 |
| Figura 21 – Fluxograma de energia do sistema de cogeração no cenário proposto. | 67 |
| Figura 22 – Fluxograma de exergia do sistema de cogeração no cenário proposto. | 67 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Capacidade instalada dos empreendimentos em operação que utilizam a biomassa como fonte de energia. | 17 |
| Tabela 2 – Estimativa da disponibilidade de palhiço de cana-de-açúcar em base seca. | 24 |
| Tabela 3 – Composição química imediata do palhiço e bagaço de cana-de-açúcar. | 25 |
| Tabela 4 – Composição química elementar do palhiço e bagaço de cana-de-açúcar. | 25 |
| Tabela 5 – Poder calorífico: palhiço e bagaço de cana-de-açúcar. | 26 |
| Tabela 6 – Custos estimados para recolhimento do palhiço considerando as rotas de enfiamento e colheita integral. | 34 |
| Tabela 7 – Energia elétrica e bagaço excedentes em sistemas de cogeração no setor sucroenergético. | 40 |
| Tabela 8 – Capacidades de processamento da unidade industrial. | 50 |
| Tabela 9 – Característica do bagaço da cana-de-açúcar. | 51 |
| Tabela 10 – Propriedades termodinâmicas dos estados do ciclo a vapor e parâmetros característicos da planta industrial operando na safra 2016/2017. | 52 |
| Tabela 11 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para a turbina de contrapressão. | 54 |
| Tabela 12 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para o desaerador. | 55 |
| Tabela 13 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para as bombas de água de alimentação. | 55 |
| Tabela 14 – Propriedades das entradas e saídas da caldeira. | 56 |
| Tabela 15 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para as caldeiras. | 56 |
| Tabela 16 – Propriedades termodinâmicas dos estados do ciclo a vapor e parâmetros característicos da planta industrial com a queima adicional do palhiço. | 59 |
| Tabela 17 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para a turbina de contrapressão. | 60 |
| Tabela 18 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para a turbina de extração-condensação. | 61 |
| Tabela 19 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para as bombas de água de alimentação. | 62 |
| Tabela 20 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para a bomba de condensado. | 63 |
| Tabela 21 – Propriedades das entradas e saídas da caldeira. | 63 |
| Tabela 22 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para as caldeiras. | 64 |
| Tabela 23 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para o desaerador. | 65 |
| Tabela 24 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para o condensador. | 65 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 10 |
| 1.2.1 | Objetivo geral | 10 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 10 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 11 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 2.1 | SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO | 12 |
| 2.2 | POTENCIAL DE GERAÇÃO DA BIOELETRICIDADE DA CANA | 15 |
| 2.3 | O PALHIÇO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR | 20 |
| 2.3.1 | Transporte e processamento do palhiço | 26 |
| 2.4 | COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROENERGÉTICO | 35 |
| 3 | METODOLOGIA | 41 |
| 3.1 | FUNDAMENTOS DA ANÁLISE TERMODINÂMICA | 42 |
| 3.1.1 | Primeira Lei da Termodinâmica | 42 |
| 3.1.2 | Segunda Lei da Termodinâmica | 44 |
| 3.2 | PANORAMA ATUAL DO ESTUDO DE CASO | 49 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 53 |
| 4.1 | CONFIGURAÇÃO ATUAL: QUEIMA EXCLUSIVA DE BAGAÇO NOS GERADORES DE VAPOR | 53 |
| 4.1.2 | Turbina a vapor de contrapressão | 53 |
| 4.1.3 | Desaerador (trocaador de calor de contato direto) | 54 |
| 4.1.4 | Bombas de água de alimentação | 55 |
| 4.1.5 | Caldeiras | 55 |
| 4.1.6 | Eficiência global do sistema | 57 |
| 4.2 | CONFIGURAÇÃO PROPOSTA: QUEIMA ADICIONAL DO PALHIÇO AO BAGAÇO NOS GERADORES DE VAPOR | 59 |
| 4.2.1 | Turbina a vapor de contrapressão | 60 |
| 4.2.2 | Turbina de extração-condensação | 61 |
| 4.2.3 | Bombas de água de alimentação | 61 |
| 4.4.4 | Bomba de condensado | 62 |
| 4.4.5 | Caldeiras | 63 |
| 4.4.6 | Desaerador | 64 |
| 4.4.7 | Condensador | 65 |
| 4.4.8 | Eficiência global do sistema | 66 |
| 5 | CONCLUSÕES | 68 |
| | REFERÊNCIAS | 70 |
| | ANEXO A – DETERMINAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EXCEDENTE | 74 |

1 INTRODUÇÃO

A energia proveniente da biomassa, a bioenergia, tem se destacado no cenário energético mundial como alternativa aos combustíveis fósseis - não renováveis e com elevado potencial de degradação ambiental, no suprimento da crescente demanda de energia global.

O Brasil é um país de destaque mundial devido à predominância de fontes renováveis na matriz energética nacional. Em 2015, de acordo com a EPE (2016), o país teve 41,2% da energia demandada suprida por fontes renováveis, das quais a participação dos derivados da cana-de-açúcar foi de 16,9%, ofertando maior quantidade de energia do que fontes tradicionais como a hidráulica (11,3%).

A cana-de-açúcar tem ganhado espaço no cenário mundial como potencial matéria-prima para geração de energia renovável de diferentes formas e usos, como o etanol, a bioeletricidade e o açúcar. Dentre as vantagens da geração de energia renovável tem-se que esta forma de produção é considerada de baixo impacto ambiental do ponto de vista das emissões de gases causadores do efeito estufa, elevando as unidades produtoras à condição de comercializadoras de créditos de carbono.

Segundo Lacerda (2015), o fim das queimadas da cana-de-açúcar na pré-colheita passou a ser uma realidade, como resultado de alterações nas legislações ambientais aplicadas ao setor, tornando-as mais severas, e o palhiço da cana-de-açúcar - adicional de biomassa antes perdido na queima - passou a ser deixado no campo. Apresentando um poder calorífico até mesmo superior ao do próprio bagaço, o palhiço passou a ser reconhecido como combustível complementar para as caldeiras das usinas, aumentando a capacidade de geração de bioeletricidade junto com o bagaço que já é usualmente empregado para esse fim (LACERDA, 2015; DEFILIPPI FILHO, 2013). O palhiço pode alcançar volumes de até 30 toneladas por hectare (base em peso úmido), sendo constituído por folhas verdes, palhas (folhas secas), ponteiros e/ou suas frações, frações de colmos (industrializáveis ou não), e eventualmente, frações de raízes e partículas de terra a eles aderida (RIPOLI *et al.*, 2003 apud DEFILIPPI FILHO, 2013).

O aproveitamento do palhiço nas usinas, através da queima em caldeiras para geração de vapor e, posteriormente, cogeração de energia, pode ser feito de forma isolada ou junto com o bagaço. Diversas alternativas de recolhimento já foram amplamente estudadas e avaliadas, destacando-se a colheita integral da cana-de-açúcar, fardo cilíndrico, picado a granel, fardo prismático ou retangular, apresentando-se como método de menor custo

específico, o recolhimento do palhiço através de enfardamento (LACERDA, 2015; DEFILIPPI FILHO, 2013).

Deve ser considerado que, para o uso do palhiço para fins energéticos, é necessária disponibilidade contínua deste resíduo, além do que, a sua retirada das áreas de produção de cana-de-açúcar deve considerar as vantagens agronômicas da manutenção de uma camada de cobertura vegetal sobre o solo, justificando a não retirada da totalidade do palhiço produzido no campo.

Diversos estudos foram realizados na atualidade com o objetivo de investigar esta nova disponibilidade de biomassa, englobando análises de caráter ambiental, logístico, energético e econômico, sendo a análise energética uma estimativa do ganho de excedentes de energia elétrica gerada com o adicional do palhiço.

1.1 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem por objetivo propor uma análise investigativa de caráter termodinâmico visando o aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar em conjunto com o bagaço na geração de excedentes de energia elétrica em uma usina sucroenergética instalada e em operação no município de Dourados, MS, utilizando como dados base os valores de produtividade de cana moída, vapor demandado pelo processo industrial e bagaço disponível para queima, referentes à safra 2016/2017, bem como os parâmetros de operação do sistema de cogeração já existente.

1.2.2 Objetivos específicos

Através da literatura, reunir dados atuais sobre a contribuição do setor sucroenergético no sistema energético brasileiro, no que diz respeito ao uso dos derivados da cana para geração de energia elétrica.

Aplicar os fundamentos da Termodinâmica como ferramenta para avaliação do sistema de cogeração com as caldeiras operando com variações na capacidade nominal de produção de vapor em função da disponibilidade dos combustíveis, ora bagaço, ora queima conjunta do palhiço e bagaço.

Quantificar a geração de potência elétrica, bem como as eficiências energéticas e exergéticas globais dos sistemas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A busca por melhorias nos sistemas energéticos existentes e a procura por novas fontes de produção de energia têm sido cada vez mais expressivas, frente ao grande crescimento da demanda da população mundial pelo consumo de energia, no Brasil evidenciado pela crise energética ocorrida em 2001, e à preocupação gerada pelas graves consequências que os gases de efeito estufa têm provocado ao meio ambiente.

Dessa forma, a biomassa da cana-de-açúcar assume papel de destaque como uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética brasileira, que além do seu crescente destaque na produção de etanol, tem em seus subprodutos, a capacidade de produzir energia. Embora a maioria das sucroenergéticas brasileiras possua autossuficiência energética, apenas uma parcela é declarada como Autoprodutores de Energia, isto é, produzem excedentes de eletricidade para serem comercializados às concessionárias de energia elétrica.

Os sistemas de cogeração empregados nas usinas sucroenergéticas compreendem em utilizar o bagaço, proveniente da extração do caldo da cana-de-açúcar, para alimentar as caldeiras e gerar vapor para atender a demanda térmica do processo e o consumo interno de eletricidade. Todavia, com o aumento da produção de cana-de-açúcar devido à expansão das áreas plantadas e às novas tecnologias empregadas e com a possibilidade de aproveitamento do palhiço através da colheita mecanizada, o potencial de geração de energia do setor está em ascensão.

Frente ao exposto, o palhiço da cana-de-açúcar, uma biomassa com potencial energético elevado, e até então perdido dentro da cadeia produtiva global de uma unidade sucroenergética, passa a ser investigado como insumo adicional em sistemas de cogeração de energia neste setor, objetivando a venda de excedentes de eletricidade e surgindo como mais uma opção de fonte geradora de receitas para as usinas, haja vista que os volumes necessários de palhiço são muito inferiores aos de bagaço, dada uma mesma quantidade de energia elétrica gerada, devido ao fato do seu poder calorífico ser superior ao do bagaço da cana-de-açúcar.

Para avaliação tanto dos excedentes como da eficiência dos processos de produção de energia, é comum utilizar os fundamentos da termodinâmica, visto a necessidade de quantificar e verificar a qualidade da energia gerada nos processos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO

A cana-de-açúcar é uma planta semi-perene da família das gramíneas, pertencente ao gênero *Saccharum*. Oriunda das regiões temperadas quentes e tropicais da Ásia, atualmente é uma das principais culturas do mundo com cultivo em mais de 100 países, e apesar desta difusão mundial, cerca de 80% da produção do planeta está concentrada em dez países, sendo eles respectivamente em ordem de maior produção: Brasil, Índia, China, México, Tailândia, Paquistão, Colômbia, Austrália, Indonésia e Estados Unidos (MATOS, 2012 apud REDÍGOLO, 2014; NOVACANA, 2017).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e apresenta em termos regionais, dois períodos distintos de safra: de setembro a março no Norte-Nordeste, e de abril a novembro no Centro-Sul; produzindo etanol quase que durante o ano todo (NEVES; CONEJERO, 2010).

A produção da cana-de-açúcar no Brasil teve início no período colonial, quando os portugueses a trouxeram para o país como uma política de exploração agrícola, já que se tratava de um produto de alto valor e crescente consumo no comércio europeu (FURTADO, 1980 apud SILVA, 2016). As primeiras mudas, oriundas da Ilha da Madeira em Portugal, foram plantadas na capitania de São Vicente/SP em 1532, onde adaptaram-se às condições ambientais existentes e rapidamente impulsionaram o desenvolvimento de grandes plantios e a formação dos primeiros engenhos, se transformando na primeira atividade economicamente organizada no Brasil (UNICA, 2017a).

O setor sucroenergético vem sendo fomentado há décadas pelo governo brasileiro. A partir da década de 30, o Estado brasileiro passa a intervir no controle e direcionamento da cultura canavieira com a criação da Comissão de Estudos sobre o Álcool-motor e da Comissão de Defesa da Produção do Açúcar, transformando-se posteriormente em um só órgão, o Instituto do Açúcar e do Álcool – IAA, e extinto nos anos 1990 pelo então presidente Fernando Collor de Mello. Essa fase inicial da ação do Estado no setor está associada à crise açucareira de 1929, quando o país perde o mercado exterior e necessita deslocar o açúcar produzido para o mercado interno, principalmente o açúcar nordestino, distante do principal mercado nacional, o Centro-Sul. Surge então, a chamada industrialização do álcool-motor, uma maneira de utilizar o excedente de açúcar e cana-de-açúcar na substituição da gasolina

importada, que via seu consumo ampliado diariamente no mercado interno (BRAY; FERREIRA; RUAS, 2000).

Nos anos de 1940, o Estado cria o Estatuto da Lavoura Canavieira com o objetivo de dinamizar a produção açucareira e alcooleira do país, através da equilibrada relação entre usineiros, fornecedores de cana-de-açúcar e trabalhadores dos canaviais. No início da década de 70, o IAA cria o Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar (PLANALSUCAR) e o Programa de Racionalização da Agroindústria Açucareira, posteriormente denominado Programa de Apoio à Agroindústria Açucareira, que visavam a melhoria da qualidade da cana-de-açúcar e a racionalização da produção de açúcar através da concessão de estímulos à fusão e incorporação de usinas, eliminando assim as pequenas usinas consideradas ineficientes como também uma grande parcela de pequenos fornecedores de cana considerados “marginais” do ponto de vista econômico (BRAY; FERREIRA; RUAS, 2000).

Em 1975, surge o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) como alternativa para a crise que o mercado açucareiro enfrentava no final de 1974, quando então o Brasil perde o Mercado Preferencial Norte-Americano, além de ver tornado sem efeito o acordo açucareiro da Comunidade Britânica quando do ingresso da Grã-Bretanha no Mercado Comum Europeu, somada à crise energética do país, ocorrida a partir de 1973, devido à elevação dos preços do petróleo. O PROÁLCOOL pode ser dividido em três fases (BRAY; FERREIRA; RUAS, 2000):

- 1975/79: Essa fase vai do surgimento do Programa até o segundo choque do petróleo, destacando a sua implementação como solução para a crise do açúcar no mercado mundial e como um programa de alternativa energética. Previa chegar-se a uma produção de 3,0 bilhões de litros de álcool;
- 1980/85: O Programa tinha como meta estabelecida atingir uma produção de 10,7 bilhões de litros de álcool (170 mil barris de petróleo-dia), caracterizando-se como um Plano que visava principalmente a substituição da gasolina;
- Pós 1986: Fase em que o governo federal suspende os financiamentos e subsídios para a instalação e ampliação de novas destilarias, passando as empresas a operar de acordo com as novas condições do mercado alcooleiro e às novas políticas do setor. O PROÁLCOOL continuou como um grande programa de alternativa energética e de substituição da gasolina, mas com perspectivas pouco definidas e uma estagnação na produção alcooleira nacional até a safra de 1993/94.

Nos anos subsequentes aos de estagnação na produção alcooleira nacional até a safra de 2008/09, o setor sucroenergético passou por um grande processo de renovação através de elevados investimentos no complexo industrial, na construção de novas unidades e no aumento da área de cultivo canavieiro, apresentando uma tendência de crescimento contínuo na quantidade de cana moída, com exceção do período entre 1998 a 2001 quando houve uma queda gerada pela crise no setor (LACERDA, 2015; NOVACANA, 2017).

Com o sucesso dos veículos *flex fuel* no mercado nacional no ano de 2003, a produção de cana-de-açúcar voltou a ter um crescimento acelerado para atender ao aumento da demanda de álcool hidratado (NOVACANA, 2017). Porém, os efeitos da crise financeira de 2008 acarretaram mudanças significativas no setor, revertendo o padrão de expansão expressiva que se verificava nos anos anteriores (LACERDA, 2015).

Frente ao novo cenário crítico, muitas empresas tiveram suas atividades prejudicadas, acumulando perdas e aumentando o endividamento, o que refletiu no encerramento das suas atividades, enquanto que, as sobreviventes no mercado foram obrigadas a paralisar os projetos de expansão e/ou modernização previstos. Nos anos seguintes, o setor sucroenergético foi caracterizado pela massiva entrada de capital estrangeiro através dos processos de fusão e aquisição de usinas brasileiras por grupos estrangeiros, consolidando-se alianças entre as empresas sucroenergéticas com empresas estabelecidas nos setores petroleiro, mineração, biotecnologia, automotivo e fundos de investimentos (LACERDA, 2015).

Segundo dados da CONAB (2017), o Brasil moeu na safra de 2016/17 (término em 31 de março de 2017) pouco mais de 657 milhões de toneladas de cana-de-açúcar com uma área destinada ao cultivo de 9,05 milhões de hectares (ha), obtendo uma produtividade de 72.623 kg.ha⁻¹. As estimativas para a safra de 2017/18 são de redução de 1,5% na moagem de cana bem como a redução de 2,3% na área a ser colhida, porém com um leve incremento de 0,9% na produtividade por unidade de área (73.273 kg.ha⁻¹), decorrente da expectativa de recuperação das lavouras na Região Norte-Nordeste (9,1%) e em menor escala na Região Centro-Sul (0,4%), principal produtora nacional, cujas causas estão relacionadas à melhoria esperada das condições climáticas.

Quanto à redução na área a ser colhida na safra futura, a menor área plantada derivou do desempenho da Região Centro-Sul (2,8%), particularmente de São Paulo (-4,5%), maior produtor nacional, agravado pelo grande número de empresas em recuperação judicial, adicionalmente afetadas pelas oscilações observadas nas cotações do açúcar, baixa competitividade dos preços internos do etanol, além dos períodos climáticos adversos,

observados nas safras anteriores, indicando uma redução absoluta de 17,7 milhões de toneladas de cana em relação à safra recém-encerrada (CONAB, 2017).

Do volume total de matéria-prima a ser processada na safra 2017/18, o percentual destinado para a produção de açúcar, neste primeiro levantamento, está estimado em 47,1%, ou seja, uma fabricação projetada de 38,70 milhões de toneladas de açúcar, praticamente o mesmo número alcançado no período 2016/17 (38,69 milhões de toneladas). A região Sudeste, maior produtora nacional, será responsável por 72% do açúcar produzido no país, seguido da Região Centro-Oeste (12%), Nordeste (8,2%) e Sul (7,7%), permanecendo São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Goiás como maiores produtores de açúcar (CONAB, 2017).

Nesse contexto, a produção esperada de etanol deverá somar 26,45 bilhões de litros, retração de 4,9% no comparativo com os 27,81 bilhões de litros verificados na safra 2016/17, da qual 11,38 bilhões de litros serão de etanol anidro e 15,07 bilhões de litros de hidratado. O decréscimo na produção está relacionado ao aumento observado no consumo da gasolina em 2016, que respalda os preços do álcool anidro nas misturas de combustível, além dos preços favoráveis do açúcar que incentivaram a produção desta commodity em detrimento do etanol (CONAB, 2017).

Além da produção de açúcar e etanol, o uso da biomassa da cana-de-açúcar, sobretudo o bagaço, tem ganhado destaque nos últimos anos devido ao seu grande potencial em quantidade e qualidade, servindo como subproduto nas unidades para a geração de energia elétrica excedente para comercialização. Todavia, frente às recentes alterações na legislação ambiental que visam a eliminação de 100% das queimadas nas áreas de plantio mecanizáveis e não mecanizáveis das usinas sucroenergéticas, o aproveitamento do palhiço remanescente no campo tem sido objeto de estudo como combustível complementar para as caldeiras das usinas, atuando diretamente no aumento da capacidade de geração de energia elétrica das unidades (DEFILIPPI FILHO, 2013).

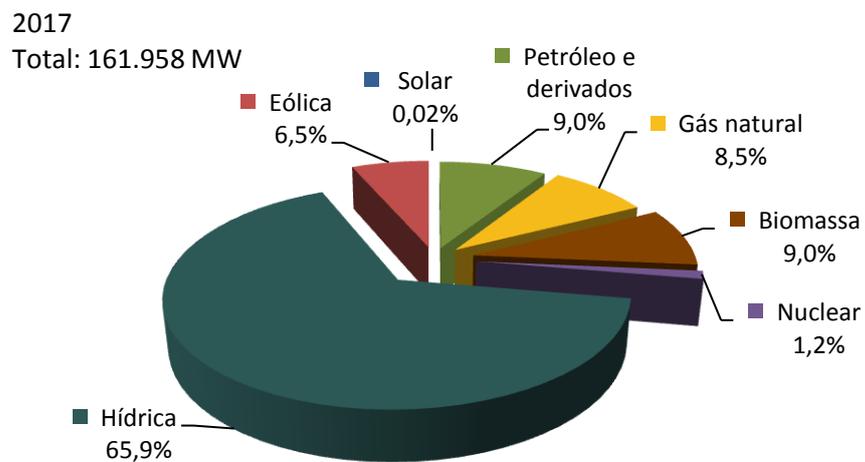
2.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO DA BIOELETRICIDADE DA CANA

A bioeletricidade é uma energia limpa e renovável advinda da biomassa da cana-de-açúcar (bagaço e palha), de resíduos sólidos urbanos e florestais, do carvão vegetal, da casca de arroz, do capim-elefante, do licor negro e outras (UNICA, 2017b). Mais recentemente, a produção de bioenergia no Brasil deixou de ser um produto de consumo próprio das usinas e passou a ser comercializada para a rede de distribuição de energia elétrica por meio de leilões do governo federal (DEFILIPPI FILHO, 2013).

Embora o primeiro contrato de venda de excedente de energia elétrica tenha sido assinado pelo país no ano de 1987, da Usina São Francisco, em Sertãozinho (SP) para a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), o primeiro leilão de energia elétrica gerada a partir de fontes renováveis no Brasil foi feito somente no ano de 2005, na cidade do Rio de Janeiro (UNICA, 2017a). De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, até outubro de 2015 foram realizados trinta e dois leilões de energia, ocorrendo venda de energia de usinas sucroenergéticas em dezenove deles (MME; EPE, 2015).

Dados do Banco de Informações de Geração – BIG (ANEEL, 2017), registram a participação da fonte biomassa em 9% da potência outorgada na matriz elétrica brasileira, no que diz respeito ao montante dos empreendimentos em operação, assumindo a segunda posição em capacidade instalada (14.513 MW), perdendo apenas para a fonte hídrica (65,9%), conforme apresentando na Figura 1.

Figura 1 – Capacidade de Geração do Brasil.



Fonte: (ANEEL, 2017).

De acordo com a Tabela 1, o setor sucroenergético detém hoje em torno de 7% da potência outorgada no Brasil e 77% da fonte biomassa, sendo a terceira fonte de geração mais importante da matriz elétrica brasileira em termos de capacidade instalada, atrás somente da fonte hídrica e das termelétricas a gás natural (ANEEL, 2017).

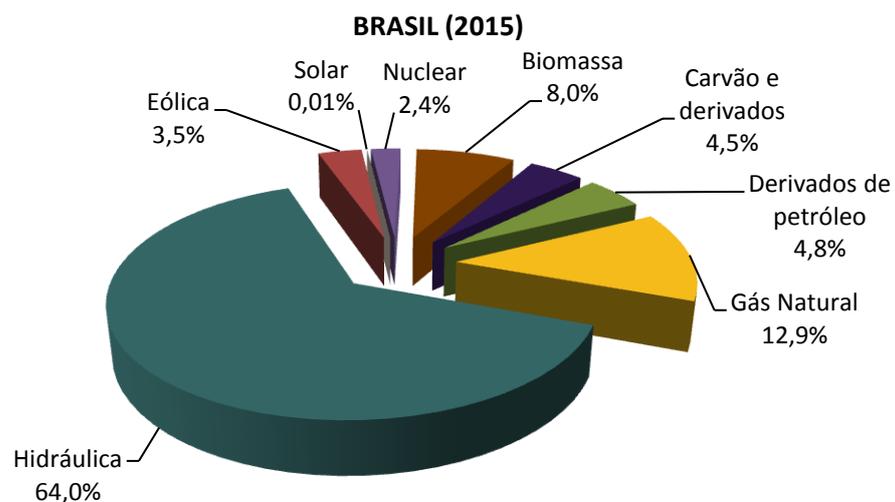
Tabela 1 – Capacidade instalada dos empreendimentos em operação que utilizam a biomassa como fonte de energia.

| Fontes de biomassa utilizadas no Brasil - Fase: Operação | | |
|--|-------------------------|--------------|
| Origem | Potência Outorgada (MW) | % |
| Bagaço de cana-de-açúcar | 11205 | 77,21 |
| Casca de arroz | 45 | 0,31 |
| Biogás - AGR | 2 | 0,01 |
| Capim elefante | 66 | 0,45 |
| Floresta | 3063 | 21,11 |
| Resíduos sólidos urbanos | 125 | 0,86 |
| Resíduos animais | 2 | 0,01 |
| Biocombustíveis líquidos | 5 | 0,03 |
| Total | 14513 | 100 |

Fonte: (ANEEL, 2017).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), em 2015, o total de geração de energia elétrica, incluindo importação e autoprodução, foi de 615,9 TWh, representando a biomassa 8,0% do total (49 TWh), ficando atrás da fonte hídrica e gás natural (Figura 2).

Figura 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte.

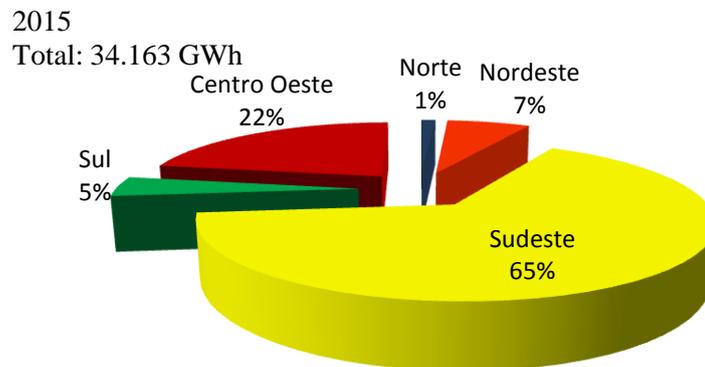


Fonte: (EPE, 2016).

Segundo a UNICA (2017c), o total de geração pela biomassa em 2016 foi 10% superior a 2015, representando 8,8% de toda a Oferta Interna de Energia Elétrica, ultrapassando o gás natural e assumindo a segunda posição de fonte de geração mais importante da matriz elétrica brasileira.

A geração de bioeletricidade da cana contribuiu, no ano de 2015, com 34,2 TWh (69,7%) do total da fonte biomassa, com destaque para a região Sudeste, responsável pela geração de 22,3 TWh ou 65% do volume contabilizado, conforme apresentado na Figura 3 (EPE, 2016).

Figura 3 – Participação das regiões brasileiras na geração de bioeletricidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: (EPE, 2016).

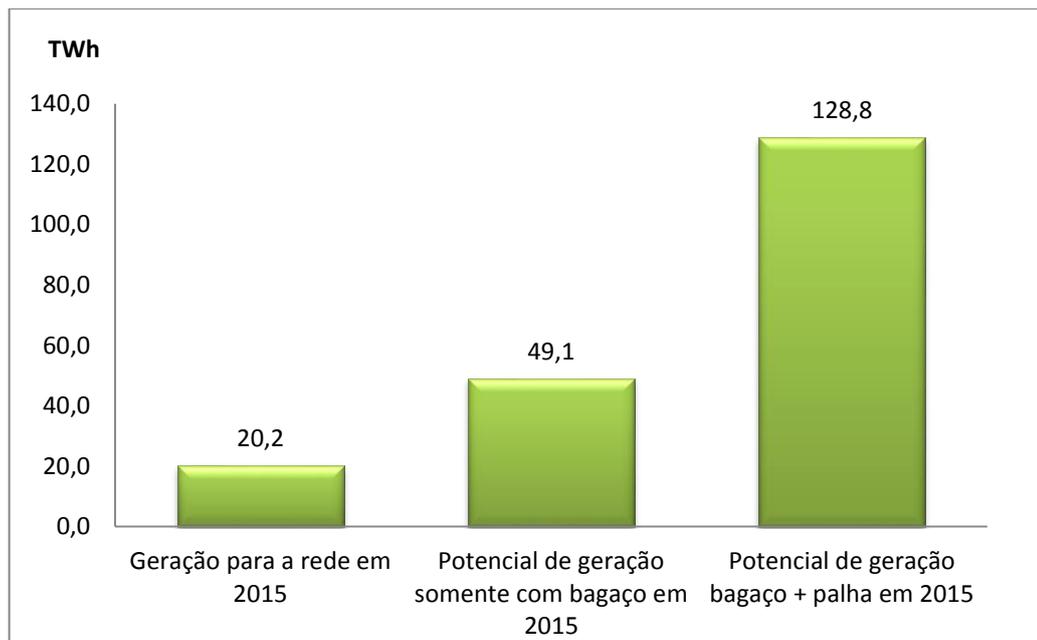
As Centrais Elétricas Autoprodutoras (APE) participaram, no mesmo ano, com 16,6% do total da geração de eletricidade, considerando o agregado de todas as fontes utilizadas, atingindo um montante de 96,6 TWh. Desse total, 52,7 TWh foram produzidos e consumidos in loco, ou seja, pela própria instalação geradora usualmente denominada como APE clássica, a qual agrega as mais diversas instalações industriais que produzem energia para consumo próprio, a exemplo dos setores de Açúcar e Álcool, Papel e Celulose, Siderurgia, Química, entre outros (EPE, 2016).

Em 2015, a geração de energia para o Sistema Interligado Nacional (SIN) pela biomassa foi de aproximadamente 23,5 TWh, dos quais o bagaço de cana participou com 20,2 TWh (86% do volume contabilizado), respondendo por 4,4% do consumo nacional de energia elétrica, o que representou aproveitar menos de 16% do potencial técnico de bioeletricidade sucroenergética daquele ano (EPE, 2016).

Desde 2013, o setor sucroenergético vem gerando mais energia elétrica para o SIN do que para o consumo próprio das unidades fabris, ficando numa relação 60% de energia para a rede e 40% para consumo próprio em 2015 (EPE, 2016).

Consoante o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, considerando o aproveitamento pleno da biomassa existente nos canaviais (bagaço e palhaço) em 2015, a geração de bioeletricidade sucroenergética para a rede tem potencial técnico para chegar a mais de seis vezes o volume do que foi ofertado à rede naquele ano, com capacidade de representar 24% do consumo nacional de energia elétrica na rede até 2024 (UNICA, 2017c). O potencial técnico da oferta de bioeletricidade da cana-de-açúcar para a rede elétrica, considerando três situações diferentes de exploração de potencial, referente ao ano 2015, é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Potencial técnico da oferta de bioeletricidade sucroenergética para a rede elétrica.



Fonte: (EPE; CCEE, 2015 apud UNICA, 2017c).

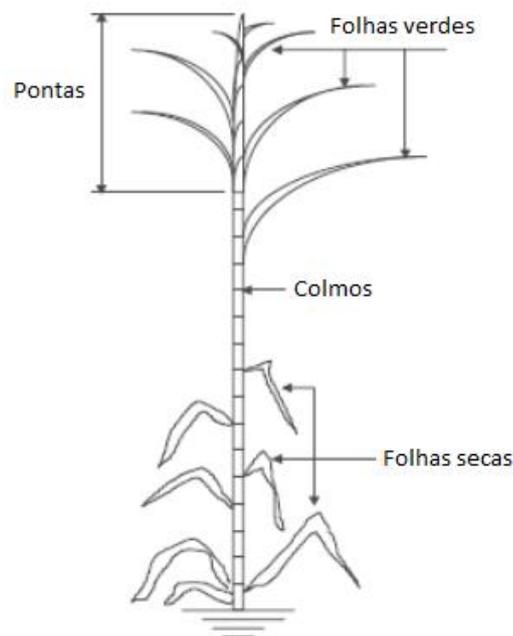
Neves e Conejero (2010, p. 196) apresentam uma prospecção para o potencial de recuperação do palhaço dos canaviais de 14,9% e 20% do total a ser produzido no ano de 2020 (118,9 milhões de toneladas) e 2030 (159,6 milhões de toneladas), respectivamente, sendo todo o palhaço recuperado no ano de 2020 destinado à produção de etanol celulósico, e apenas 41% do palhaço recuperado em 2030 destinado à produção de bioeletricidade.

2.3 O PALHIÇO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

De acordo com Nevez e Conejero (2010), a energia disponível em 1 tonelada de cana-de-açúcar é equivalente à 1,2 barril de petróleo, estando o seu conteúdo energético subdividido em 1/3 de melaço (açúcar e etanol), 1/3 de bagaço e 1/3 de palhiço.

Segundo Ripoli e Ripoli (2004 apud DEFILIPPI FILHO, 2013), o palhiço é caracterizado como um conjunto de estruturas que ficam sobre a superfície do talhão após a colheita mecanizada, tais como folhas verdes, palhas (folhas secas), ponteiros, frações de colmos e frações de raízes e partículas de terra aderidas às estruturas. A Figura 5 ilustra as partes componentes da planta de cana-de-açúcar.

Figura 5 – Estrutura típica da cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado de (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005).

Com a eliminação gradativa da queima da cana-de-açúcar no processo de pré-colheita no chamado sistema de colheita por cana queimada, e a introdução do sistema de colheita mecanizada sem queima, o palhiço deixou de ser descartado e passou a ser lançado ao solo na fase de separação pneumática. Se recolhido e transportado até a unidade industrial, o palhiço deixa de ser meramente um resíduo vegetal e se torna um insumo energético para o processo de cogeração nas próprias usinas (MAEDA, 2012; SOUZA et al., 2005).

A evolução do sistema de colheita da cana tem se dado em função da implementação de um cronograma ajustado entre o governo federal e alguns estados brasileiros, a exemplo, os Estados de São Paulo (Lei nº 11.241/02) e Mato Grosso do Sul (Lei nº 3.357/07) onde o período de transição entre os sistemas de colheita já está em vigência, bem como os prazos finais para conclusão (MATO GROSSO DO SUL, 2007; SÃO PAULO, 2002).

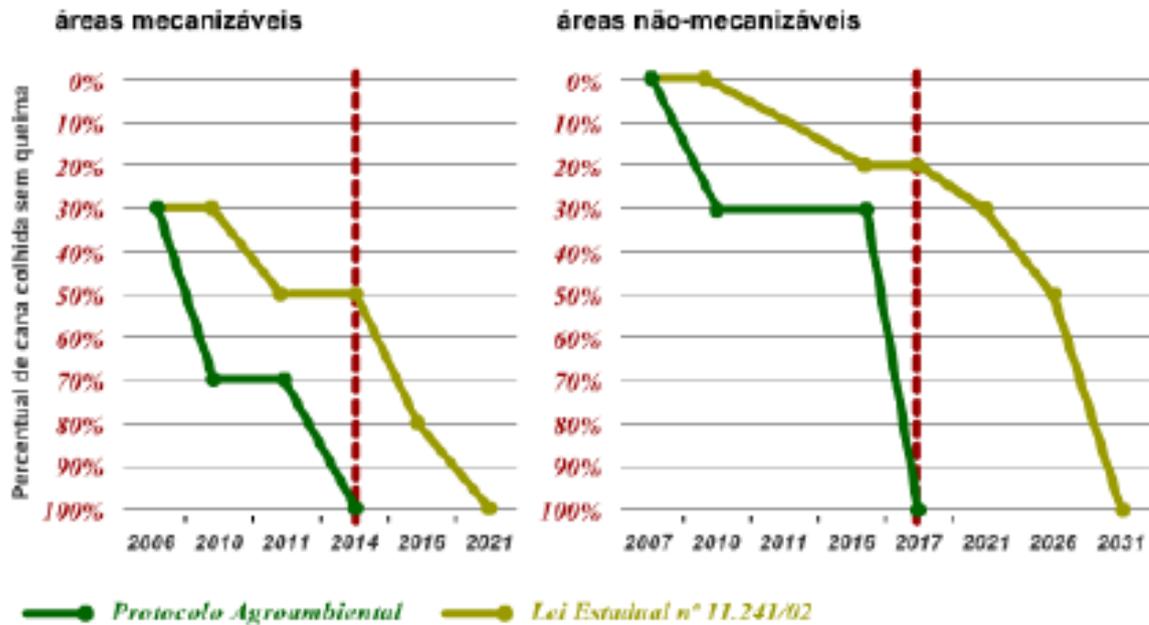
Pela Lei nº 11.241, de 2002, do Estado de São Paulo, o prazo para a eliminação do emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas foi definido em 30 anos, passando o sistema de colheita da cana a ser integralmente mecanizado. Nas áreas mecanizáveis (áreas de plantio acima de 150 hectares e com declividade igual ou inferior a 12%) seria extinta a queima do palhicho até 2021, e até 2031 nas áreas de plantio com declividade superior a 12% e/ou áreas com estrutura de solo que inviabilizem a adoção de técnicas usuais de mecanização da atividade de corte de cana (áreas não-mecanizáveis) (SÃO PAULO, 2002).

Entretanto, através do Protocolo Agroambiental assinado pelo Governo do Estado e por entidades representantes da indústria sucroenergética (UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar e ORPLANA – Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil), os prazos de eliminação da queima do palhicho foram antecipados, passando a valer o final de 2014 para as áreas mecanizáveis e 2017 para as áreas não-mecanizáveis. A Figura 6 mostra a comparação entre os prazos da lei estadual e do Protocolo Agroambiental para a eliminação da queima do palhicho da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

Pela Lei nº 3.357, de 2007, do Estado de Mato Grosso do Sul, o prazo máximo para a eliminação do emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais sul mato-grossense foi definido em 30 anos, passando o sistema de colheita da cana a ser integralmente mecanizado. Nas áreas mecanizáveis (áreas com declive inferior a 12%) a queima do palhicho deverá ser totalmente eliminada até 2025, a contar do ano de 2006, à razão de 5% ao ano, pelo menos, e até 2030 nas áreas de plantio não-mecanizáveis, nas quais dar-se-á a partir do ano de 2010, à razão de 5% ao ano, pelo menos, até que tais áreas possam ser dispensadas do cultivo de cana ou que surjam novas tecnologias que permitam explorá-las sem necessidade de queima (MATO GROSSO DO SUL, 2002).

As perspectivas da cogeração de energia com o bagaço de cana-de-açúcar podem ser potencializadas quando considerado um incremento na potência instalada em função do emprego do palhicho e, conseqüentemente, a repotencialização das usinas, aumentando consideravelmente as capacidades de geração de energia.

Figura 6 – Prazos para a eliminação da queima do palhiço da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.



Fonte: (UNICA, 2008 apud REDÍGOLO, 2014).

Para Corrêa Neto (2001), a disponibilidade de palhiço remanescente no campo varia entre outros fatores, segundo a variedade de planta cultivada, a idade da cultura, o estágio de corte, a situação climática, o sistema de colheita mecanizada com ou sem queima prévia, e a altura de corte dos ponteiros.

De acordo com Ripoli et al. (1990), analisando três variedades de cana-de-açúcar (SP70-1284, SP70-6163 e SP70-1143) colhidas sem queima prévia na região de Ribeirão Preto (SP), a disponibilidade em massa de palhiço variou de 17,40% a 31,50% em relação à quantidade de colmos industrializáveis contida nos canaviais. Em outra pesquisa, na região de Piracicaba (SP), o autor estimou a quantidade de constituintes do palhiço em outra variedade de cana (SP71-1406), considerando crua e queimada, obtendo valores de 25% e 15%, respectivamente, para a disponibilidade em massa de palhiço em relação à quantidade de colmos industrializáveis contida nos canaviais (RIPOLI; RIPOLI, 1995).

Furlani Neto, Ripoli e Villa Nova (1997) verificaram a quantidade média de palhiço remanescente da colheita mecanizada em canaviais paulistas (região de Ribeirão Preto), com queima prévia, como sendo de 8,09 t.ha⁻¹ para a variedade SP71-1406 e 10,25 t.ha⁻¹ para a variedade SP71-6163. Para o caso de colheita mecânica sem queima prévia, as quantidades seriam de 13,51 t.ha⁻¹ para a variedade SP71-1406 e 24,32 t.ha⁻¹ para a variedade SP71-6163,

resultando em um incremento na produtividade de palhiço de 70% e 137% para as respectivas variedades.

Para Sartori (2001), ficou comprovada a existência de uma grande variação na quantidade disponível de palhiço remanescente no campo, no sistema de colheita mecanizada sem queima prévia, decorrente da variedade plantada, idade da planta e condições edafoclimáticas, encontrando valores na faixa de $6,0 \text{ t.ha}^{-1}$ a $22,8 \text{ t.ha}^{-1}$.

Ripoli (2002) realizou o mapeamento da umidade do palhiço recolhido e enfardado no campo, aplicando as técnicas de agricultura de precisão, encontrando uma variabilidade de 14,68% a 30,50%. Além da variação no grau de umidade do palhiço recolhido, a análise dos resultados mostrou que existe uma variação na quantidade de palhiço recolhido (de $4,74 \text{ t.ha}^{-1}$ a $14,56 \text{ t.ha}^{-1}$, com média de $8,79 \text{ t.ha}^{-1}$), como também acontece com a própria produtividade de colmos da cana-de-açúcar, apontando para a necessidade de cuidados nas amostragens e na determinação da produtividade do resíduo.

Avaliando parâmetros de desempenho para recolhimento por enleiramento e enfardamento prismático do palhiço da cana colhida mecanicamente sem queima prévia, Torrezan (2003) notou uma produtividade média de colmos industrializáveis de 78 t.ha^{-1} e uma produtividade média estimada de palhiço de $27,01 \text{ t.ha}^{-1}$, com palhiço formado por folhas (68,93%), colmos (21,44%), ponteiros (2,27%) e matérias estranhas totais (6,36%), e umidade de 22,80%. Considerando matéria seca, a produtividade estimada de palhiço foi de $20,85 \text{ t.ha}^{-1}$.

De acordo com um estudo experimental conduzido pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), sobre o aproveitamento energético da biomassa da cana (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005), com análises a respeito da disponibilidade de palhiço e suas possibilidades de usos energético e agrônômico, a quantidade estimada de palhiço disponível em base seca foi de $14,4 \text{ t.ha}^{-1}$, o equivalente a 14% dos colmos industrializáveis de cana-de-açúcar. As áreas produtoras estudadas estão localizadas nas regiões de Ribeirão Preto e Piracicaba, sendo analisadas três variedades de cana (SP79-1011, SP80-1842 e RB72454) e em três estágios de corte (Cana Planta 18 meses, segundo corte e quarto corte). Os resultados do experimento são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Estimativa da disponibilidade de palhiço de cana-de-açúcar em base seca.

| Variedade | Estágio de Corte | Produtividade de Colmos (t.ha ⁻¹) | Palhiço (t.ha ⁻¹) | Índice de Palhiço (%) |
|--------------|------------------|---|-------------------------------|-----------------------|
| SP79-1011 | Cana Planta | 120 | 17,8 | 15 |
| | 2° Corte | 92 | 15,0 | 16 |
| | 4° Corte | 84 | 13,7 | 16 |
| SP80-1842 | Cana Planta | 136 | 14,6 | 11 |
| | 2° Corte | 101 | 12,6 | 13 |
| | 4° Corte | 92 | 10,5 | 11 |
| RB72454 | Cana Planta | 134 | 17,2 | 13 |
| | 2° Corte | 100 | 14,9 | 15 |
| | 4° Corte | 78 | 13,6 | 17 |
| Média | | 104 | 14,4 | 14 |

Fonte: Adaptado de (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005).

Os valores estimados por Hassuani, Leal e Macedo (2005) foram obtidos durante as safras de 97/98 e 98/99, sendo os valores apresentados na Tabela 2 as médias dos resultados encontrados para as duas regiões analisadas. Os autores ainda apontam que, embora o país cultive um grande número de variedades de cana-de-açúcar, as três variedades estudadas representaram na safra 98/99, 35% da cana-de-açúcar colhida no Brasil e 40% da cana colhida no estado de São Paulo. Sendo assim, é possível aceitar neste trabalho que a quantidade média de palhiço produzida por tonelada de cana é de 14%, ou ainda, 140 kg de palhiço seco por tonelada de cana. Este valor passou a ser considerado o valor padrão da disponibilidade do resíduo no campo diante da frequente introdução de novas variedades com rendimentos de palhiço desconhecidos e da grande dificuldade de correlacionar os rendimentos de cana e palhiço.

Quando se discute a retirada do palhiço dos canaviais para posterior aproveitamento energético, é de extrema importância considerar as vantagens agrônômicas da manutenção de uma camada de cobertura vegetal sobre o solo. Isto influi e justifica a não retirada da totalidade do palhiço produzido no campo (LACERDA, 2015).

Orlando Filho et al. (1998) destacam que, em solos com maior cobertura vegetal, ocorre maior capacidade de retenção de água, provavelmente devido ao maior teor de matéria orgânica, como acontece com a presença do palhiço, proporcionando maior manutenção de umidade, responsável por grande parte das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

De forma mais conclusiva, estudos e experimentos realizados recentemente apontam que um percentual de recolhimento até 50% do palhiço de cana-de-açúcar remanescente no campo não interfere nos aspectos físicos, químicos e biológicos do solo. Assim sendo, o recolhimento de palhiço para o aproveitamento energético, nessa faixa percentual, não resultará em prejuízos à produção, ao manejo e à estabilidade da cultura no meio ambiente (DEFILIPPI FILHO, 2013).

Seabra (2008) afirma que para se ter a noção exata do potencial de um material como energético é essencial que se conheça as suas propriedades físico-químicas. Em processos de conversão termoquímica, como a combustão, a composição química (elementar e imediata) e o poder calorífico são as propriedades de maior interesse.

Existem diversos estudos a respeito das propriedades físico-químicas da biomassa da cana-de-açúcar (bagaço e palhiço). Neste trabalho, para a composição química e poder calorífico do palhiço e bagaço de cana, foram adotados como referência os valores apresentados por Linero (2012 apud DEFILIPPI FILHO, 2013), que são resultados de um extenso estudo experimental, conduzido pelo Centro de Tecnologia Canavieira, sobre o potencial da biomassa da cana como combustível. As propriedades físico-químicas do palhiço e bagaço de cana são apresentadas nas Tabelas 3 a 5.

Tabela 3 – Composição química imediata do palhiço e bagaço de cana-de-açúcar.

| Imediata (%) | Umidade | Cinzas | Voláteis | Carbono Fixo |
|---------------------|----------------|---------------|-----------------|---------------------|
| Palhiço | 22,2 | 9,0 | 75,1 | 15,8 |
| Bagaço | 51,2 | 3,2 | 83,1 | 13,7 |

Fonte: (LINERO, 2012 apud DEFILIPPI FILHO, 2013).

Tabela 4 – Composição química elementar do palhiço e bagaço de cana-de-açúcar.

| Elementar (%) | C | H | N | O | S | Cl |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Palhiço | 47,9 | 6,4 | 0,6 | 44,7 | 0,1 | 0,2 |
| Bagaço | 45,6 | 5,8 | 0,4 | 48,2 | - | - |

Fonte: (LINERO, 2012 apud DEFILIPPI FILHO, 2013).

Tabela 5 – Poder calorífico: palhiço e bagaço de cana-de-açúcar.

| | PCS ¹ (MJ/kg) | Umidade (%) | PCI ² (MJ/kg) |
|---------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| Palhiço | 17,0 | 15 | 12,9 |
| Palhiço | 17,0 | 35 | 9,4 |
| Bagaço | 18,0 | 50 | 7,2 |

Fonte: (LINERO, 2012 apud DEFILIPPI FILHO, 2013).

¹ Poder Calorífico Superior expresso em matéria seca.

² Poder Calorífico Inferior.

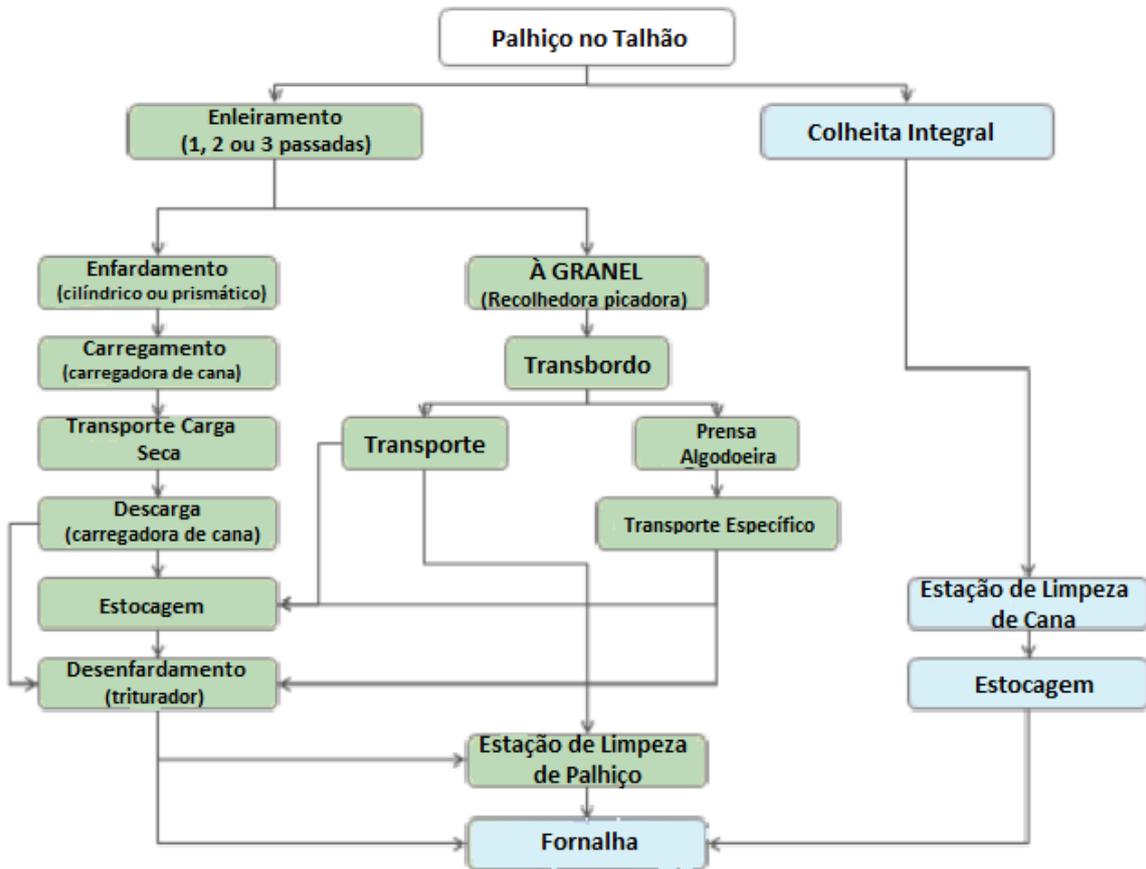
2.3.1 Transporte e processamento do palhiço

Para Ripoli e Ripoli (1995), o custo elevado do processo de recuperação do palhiço remanescente nos canaviais é a grande questão para o seu aproveitamento junto ao bagaço de cana nos sistemas de cogeração de energia dentro das unidades industriais.

Ripoli, Ripoli e Gamero (2003) afirmam que pesquisas promovidas pela iniciativa privada e órgãos governamentais estão centradas em algumas opções de recolhimento do palhiço, como o recolhimento a granel feito por colhedoras de forragens; enfardamento prismático ou cilíndrico; enfardamento por prensas algodoeiras; e colheita de cana integral, com as colhedoras operando com os sistemas de limpeza desligados. Ao avaliarem a eficiência energética do palhiço recolhido em três diferentes sistemas, os autores obtiveram valores de 99,22% para a colheita integral, 96,41% para o palhiço colhido a granel e 91,45% para o palhiço enfardado.

Na Figura 7 são apresentadas, segundo Ripoli (2002 apud DEFILIPPI FILHO, 2013), as principais operações que compõe as diferentes rotas para o recolhimento do palhiço remanescente no campo.

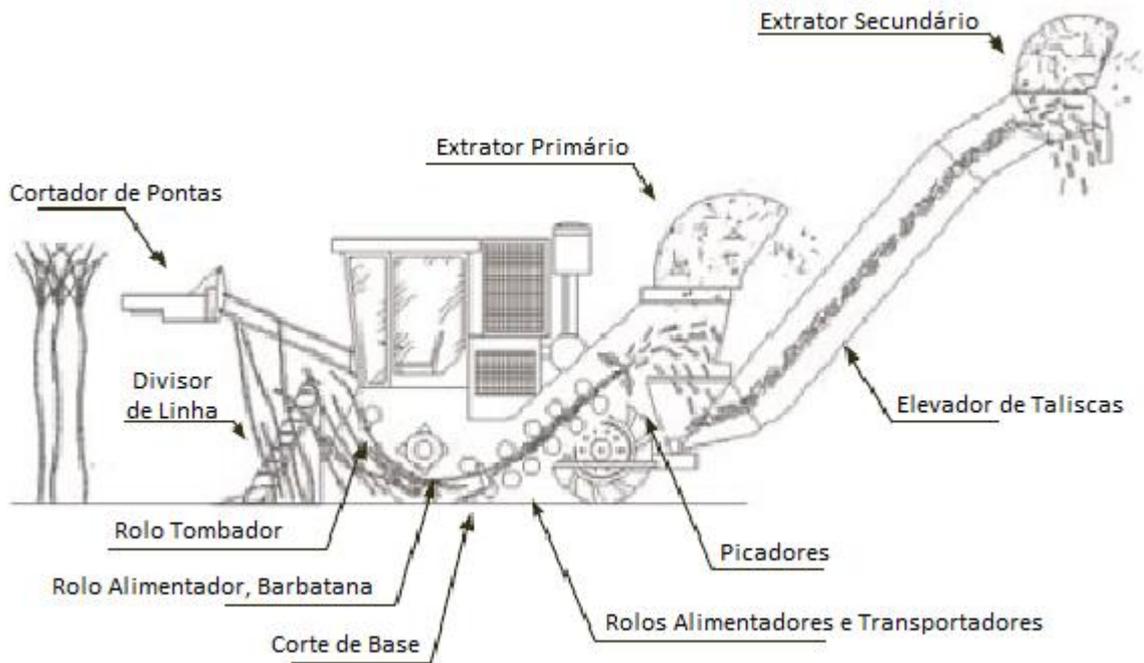
Figura 7 – Rotas e operações para o recolhimento do palhiço remanescente no campo.



Fonte: (DEFILIPPI FILHO, 2013).

De acordo com Germek (2005), no sistema de colheita de cana integral, a cana-de-açúcar crua colhida de forma integral, contendo os colmos e o palhiço, chega à unidade industrial transportada por veículos de carga tradicionais utilizados pelo setor. A inserção do palhiço no volume de cana colhida mecanicamente é realizada por intermédio da regulagem da velocidade do extrator primário, o qual, juntamente com o extrator secundário, tem a função de limpar os colmos de cana já fracionados (Figura 8). Reduzir a velocidade do extrator primário implicará no aumento da quantidade de palhiço na carga de cana, reduzindo a densidade da carga e aumentando os custos de transporte (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005). Assim sendo, a questão primordial é estabelecer uma velocidade de extração primária (mantendo o extrator secundário desligado) para atender aos requisitos da quantidade de palhiço na carga de cana e, portanto, nos campos.

Figura 8 – Esquema representativo de uma colhedora de cana-de-açúcar picada.



Fonte: Adaptado de (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005).

Ainda, de acordo com Hassuani, Leal e Macedo (2005), no sistema de colheita integral, os níveis de impurezas vegetais agregadas refletiram no aumento de 5% para 16% na carga total transportada do campo até a unidade industrial, com umidade média do palhiço de 31% e densidade de carga transportada inferior em 34% da obtida no sistema de colheita convencional.

Na chegada da carga à usina, a mesma deve ser direcionada a uma estação de limpeza a seco, conforme ilustrado na Figura 9, onde é submetida a uma forte corrente de ar a fim de que sejam separadas das frações de colmo, as impurezas minerais (terra) e vegetais (folhas e palhas). Após a separação na câmara insufladora, as frações de colmo seguem, então, para a operação de extração (moagem) e o palhiço é enviado para uma peneira rotativa para eliminar a terra, seguido do processo de trituração e, finalmente, para as esteiras do bagaço, com destino à caldeira (MAEDA, 2012).

Figura 9 – Sistema de limpeza de cana a seco.



a) Vista geral



b) Câmara insufladora



c) Peneira rotativa e moega coletora de terra e palha

Fonte: (SIMISA, 2017)¹.

Os resultados de eficiência apresentados pelo Centro de Tecnologia Canavieira (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005), através de testes em campo, indicam que o processo de limpeza e separação na estação pode proporcionar uma redução de 55% a 60% do total das impurezas vegetais e de 45% a 72% do total das impurezas minerais presentes na cana-de-açúcar.

¹ Disponível em: <<http://www.simisa.com.br/sistema-de-limpeza-de-cana-seco/#>>. Acesso em: 25 maio 2017.

De acordo com Simisa (2013 apud REDÍGOLO, 2014), uma má limpeza da cana-de-açúcar pode acarretar em diversos problemas na cadeia de processamento industrial, destacando-se:

- Desgaste dos componentes mecânicos atuantes em todo o processo de transporte, preparo e moagem da cana-de-açúcar;
- Problemas operacionais no setor de tratamento do caldo, filtragem de lodo e desgastes de bombas e tubulações de caldo;
- Aumento da carga e do consumo de potência no picador, desfibrador e moendas;
- Redução da extração devido às impurezas vegetais incorporarem açúcar em sua composição durante os processos de extração.

No sistema de recolhimento a granel, a separação do palhiço da carga de cana é feita na colheita, de forma mecânica, com os sistemas de limpeza das colhedoras em funcionamento. As operações agrícolas envolvidas no recolhimento do palhiço remanescente no campo são o enleiramento convencional, o recolhimento por meio de colhedora picadora de forragem (Figura 10), e posterior transporte, a granel, em veículos do tipo gaiola até a unidade industrial. O material é descarregado no pátio de bagaço da usina por pás carregadoras (GERMEK, 2005).

Em um teste de recolhimento a granel do palhiço envolvendo uma prensa de algodão, realizado por Lima (2002, apud MELLO, 2009), a densidade do palhiço aumentou em 216% (190 kg.m^{-3}) depois de adensado, ainda no campo, quando comparado à sua massa específica no campo após a colheita (60 kg.m^{-3}). Além disso, o teste relatou a presença de 4% de material mineral no palhiço recolhido (50% do total remanescente), umidade do palhiço de 12% no momento do recolhimento, e custo total de recolhimento por este processo de $\text{R\$}17,00.t^{-1}$.

Para Franco (2003), em estudo realizado do recolhimento do palhiço a granel, no qual verificou o desempenho das máquinas utilizadas, a presença de terra no palhiço enleirado e posteriormente recolhido por uma colhedora de forragens autopropelida, foi de 7,6%. O custo total de recolhimento do palhiço por este processo foi de $\text{R\$}9,17.t^{-1}$.

No sistema de recolhimento do palhiço por enfardamento, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar é realizada com os extratores primário e secundário da colhedora operando normalmente, tal que o máximo de palhiço seja separado dos colmos e lançado no campo (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005).

Figura 10 – Enleiramento e recolhimento do palhiço a granel por ancinhos rotativos verticais e colhedora/picadora de forragem autopropelida.



a) Ancinhos rotativos verticais



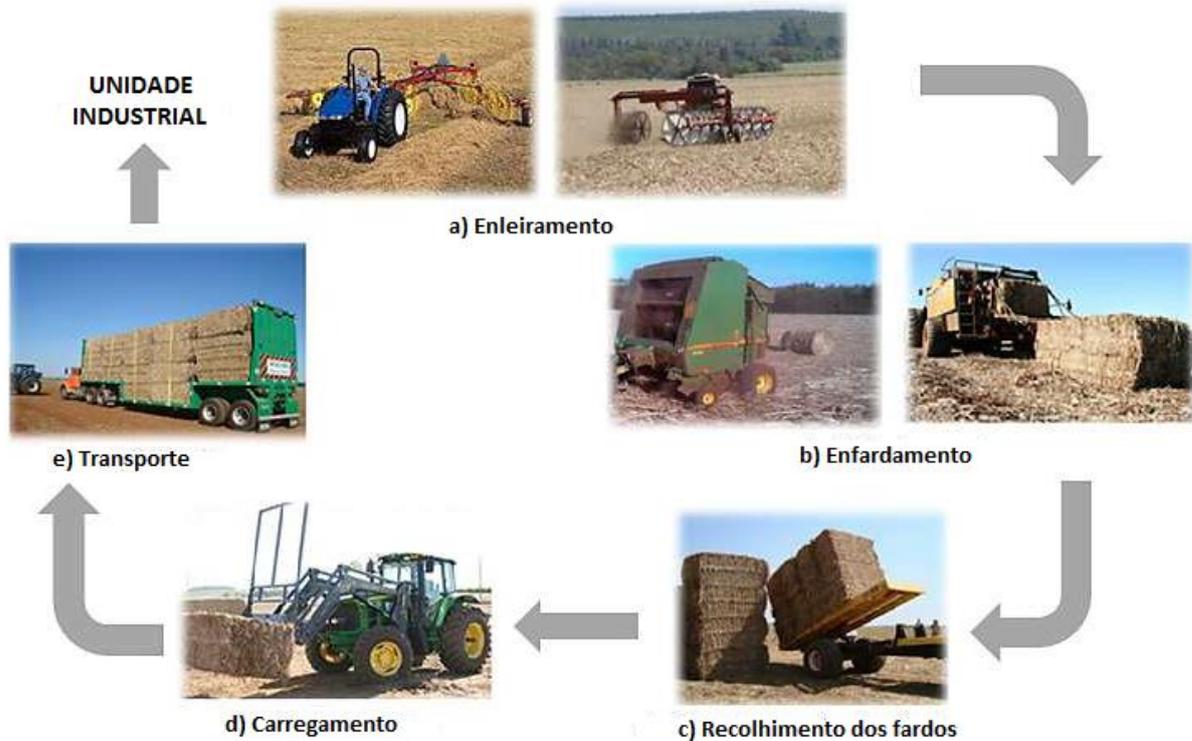
b) Colhedora/picadora autopropelida

Fonte: (GERMEK, 2005).

De acordo com Pierossi e Fagundes (2013 apud LACERDA, 2015), a rota do enfardamento consiste em recolher o palhiço remanescente no campo após 4 a 7 dias da colheita mecânica crua da cana-de-açúcar, já que no instante da colheita, grande parte das folhas encontram-se verdes e apresentam umidade média de 40%. Esse tempo é aguardado, a fim de que, a umidade do palhiço seja reduzida, através da secagem natural do material no campo, devendo estar entre 10% e 15%, podendo em alguns casos, devido às condições climáticas locais, chegar a valores de até 5%. A sequência de operações de recolhimento executadas na rota do enfardamento é ilustrada no esquema da Figura 11.

A etapa inicial do sistema de recolhimento do palhiço por enfardamento, denominada enleiramento, consiste em agrupar o material deixado no campo em leiras triangulares, de tal modo que a quantidade de impurezas minerais adicionada ao fardo e o desempenho operacional da enfardadora são diretamente afetados pela forma como o processo é realizado. A operação subsequente envolve o recolhimento do palhiço contido na leira pela enfardadora, compactando-o em fardos retangulares e/ou cilíndricos. Os fardos então são depositados automaticamente no campo conforme vão sendo produzidos, sendo posteriormente recolhidos e agrupados em pilhas pela carreta recolhadora de fardos e, por conseguinte, colocados em caminhões que os transportarão até o pátio de armazenamento da usina. Ao chegarem à unidade industrial, os fardos são submetidos aos processos de desenfardamento, trituração e limpeza de minerais, para então serem queimados na caldeira (PIEROSI; FAGUNDES, 2013 apud LACERDA, 2015).

Figura 11 – Recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar através do enfardamento.



Fonte: (LACERDA, 2015).

O processo de limpeza mineral do palhiço é de extrema importância, principalmente, em unidades industriais que operam caldeiras geradoras de vapor com queima em suspensão, onde o índice de impurezas minerais é um fator crítico no processo devendo corresponder a no máximo 2% do conteúdo do material a ser queimado (PIERROSSI; FAGUNDES, 2013 apud LACERDA, 2015). Segundo Ripoli (2004), o teor de impurezas minerais encontrado em amostras de palhiço enfardado é da ordem de 6,4%.

Hassuani, Leal e Macedo (2005) citam alguns aspectos importantes na rota de enfardamento, como os detalhes do sistema de compactação, os quais conferem diferentes densidades, formas e dimensões dos fardos, que devem ser otimizados objetivando-se viabilizar o transporte e facilitar o empilhamento dos fardos.

De acordo com Pierossi e Fagundes (2013 apud DEFILIPPI FILHO, 2013), os tipos mais comuns de enfardadoras são as de fardos prismáticos ou retangulares e as enfardadoras de fardos cilíndricos, ambas tracionadas e acionadas por tratores. As dimensões dos fardos produzidos variam muito em função do tipo de enfardadora e do modelo e projeto do fabricante do maquinário. Os autores apontam uma variação nas dimensões dos fardos

prismáticos de 0,45m a 1,20m de largura por 0,35m a 0,90m de altura com comprimento de 0,50m podendo chegar até 2,50m, enquanto os fardos cilíndricos variam de 0,60m a 1,80m de diâmetro e largura de 1,20m até 1,60m.

Para Defilippi Filho (2013), os custos de recolhimento do palhiço no campo, enfardamento e transporte até a usina são diretamente influenciados pela rota de recolhimento utilizada, umidade e densidade da carga de palhiço transportada e distância da frente de colheita até a unidade industrial.

Trabalhos recentes realizados pelo Centro de Tecnologia Canavieira (2011, apud DEFILIPPI FILHO, 2013) mostram que a densidade dos fardos prismáticos grandes de palhiço pode atingir valores ao redor de 180 kg.m^{-3} , alcançando valores em massa próximos de 490 kg por fardo.

Ripoli (2002), ao realizar um mapeamento do palhiço recolhido utilizando conceitos da Agricultura de Precisão, verificou que as massas específicas do palhiço enfardado por enfardadora prismática e cilíndrica, foram de $218,4 \text{ kg.m}^{-3}$ e $166,5 \text{ kg.m}^{-3}$, respectivamente.

Estudos realizados pela Copersucar (1999 apud MELLO, 2009) sobre a viabilidade de se recolher o palhiço, indicaram que o uso de fardos prismáticos grandes leva aos melhores resultados econômicos no recolhimento da biomassa, ocasionado pela maior capacidade operacional das enfardadoras e pela melhor ocupação do volume no transporte. Em um dos estudos, o qual considerou as etapas de enleiramento e enfardamento, o custo total do recolhimento do palhiço foi composto pelos custos relativos ao enleiramento, à enfardadora, à corda de amarração do fardo, ao carregamento dos fardos e ao transporte. Além dos custos, avaliou-se a quantidade de terra encontrada nos fardos, com enleiramento prévio, situando-se próximo de 6%.

Um dos trabalhos mais amplos que compararam os sistemas de recolhimento do palhiço pela rota do enfardamento e da colheita integral foi apresentado por Hassuani, Leal e Macedo (2005). Os autores estudaram a influência de diversas variáveis no custo do recolhimento do palhiço para as médias de cinco anos de vida do canavial, distância da lavoura à usina de 19 km, produtividade de $83,23 \text{ t.ha}^{-1}$, três frentes de colheita mecânica e moagem de cana anual de 1,3 milhões de toneladas. A primeira variável considerada foi a rota de recolhimento adotada, cujos resultados encontrados estão resumidos na Tabela 6.

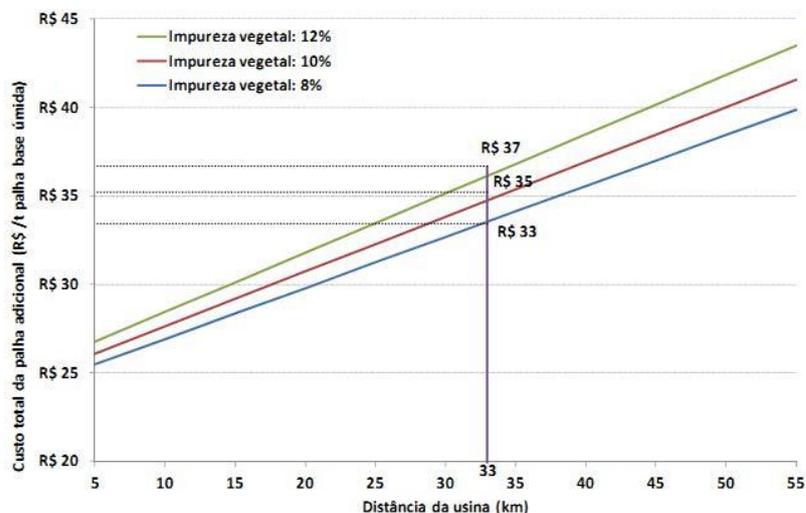
Tabela 6 – Custos estimados para recolhimento do palhiço considerando as rotas de enfardamento e colheita integral.

| | Enfardamento | Colheita Integral |
|---|--------------|-------------------|
| Palhiço Disponível no Campo ($t_{\text{massa seca/ano}}$) | 180.687 | 180.697 |
| Palhiço Recolhido ($t_{\text{massa seca/ano}}$) | 114.902 | 119.531 |
| Eficiência do Recolhimento (%) | 64 | 66 |
| Custo do Palhiço Final (US\$/ $t_{\text{massa seca}}$) | 18,49 | 31,12 |

Fonte: Adaptado de (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005).

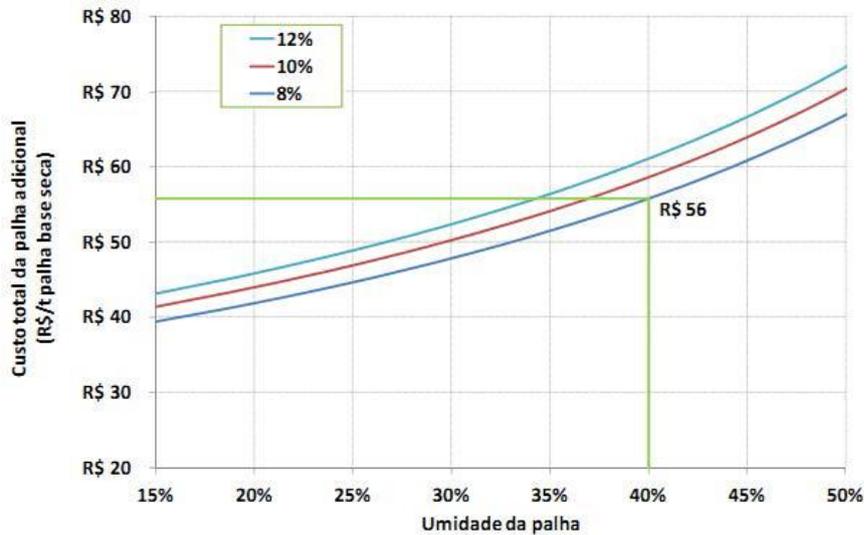
Os pesquisadores do Centro de Tecnologia Canaveira (2013 apud REDÍGOLO, 2014) observaram, em uma análise mais detalhada, a influência das impurezas vegetais no transporte de cana-de-açúcar, relatando que a cada 1% de impureza vegetal tem-se uma redução de 3,8% de carga transportada, o que irá acarretar diretamente no custo do transporte. Em uma usina com moagem de 6,9 milhões de toneladas de cana, 104 rodotrens para o transporte da cana-de-açúcar com 6% de impureza vegetal a um raio médio de 33km, o custo total do palhiço adicional para 8, 10 e 12% de impureza vegetal, considerando a colheita, transbordo e transporte, é representado na Figura 12. Além da influência das impurezas vegetais, o estudo também mostrou que a umidade tem interferência direta no custo total do palhiço da cana-de-açúcar da lavoura à usina, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 12 – Influência da impureza vegetal no custo total do palhiço.



Fonte: (REDÍGOLO, 2014).

Figura 13 – Influência da umidade no custo total do palhiço.



Fonte: (REDÍGOLO, 2014).

2.4 COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROENERGÉTICO

O termo cogeração pode ser definido como a geração simultânea de calor útil e energia mecânica, geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir de uma mesma fonte de energia primária para atender as necessidades de uma unidade de processo. Nos sistemas de cogeração, normalmente são utilizados os ciclos Rankine e Brayton, os quais empregam turbinas a vapor e turbinas a gás, respectivamente (LACERDA, 2015).

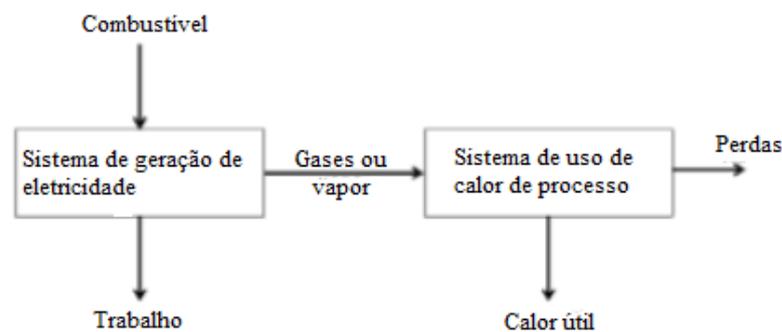
Para Pacheco e Correia (2015) o uso da cogeração tem sido enfatizado pelas mudanças no mercado de energia elétrica decorrentes da degradação da qualidade dos serviços de eletricidade, aumento do risco de desabastecimento, elevação das tarifas de fornecimento, necessidades do processo industrial e perspectivas de geração de receitas adicionais.

O uso dos sistemas de cogeração tem se tornado frequente em indústrias que dispõem de subprodutos do processo industrial com elevado potencial energético, a exemplo dos gases de coqueria, de alto forno e de aciaria na indústria siderúrgica; do licor negro e resíduos de madeira na indústria de celulose; e, em especial, do bagaço, e mais recentemente, do palhiço e da vinhaça no setor sucroenergético.

Os sistemas de cogeração são classificados, quanto à ordem do fluxo de calor e sua conversão em energia eletromecânica, em dois grandes grupos: Sistemas *Topping* e *Bottoming*. Na configuração *Topping* a geração de energia elétrica antecede o aproveitamento

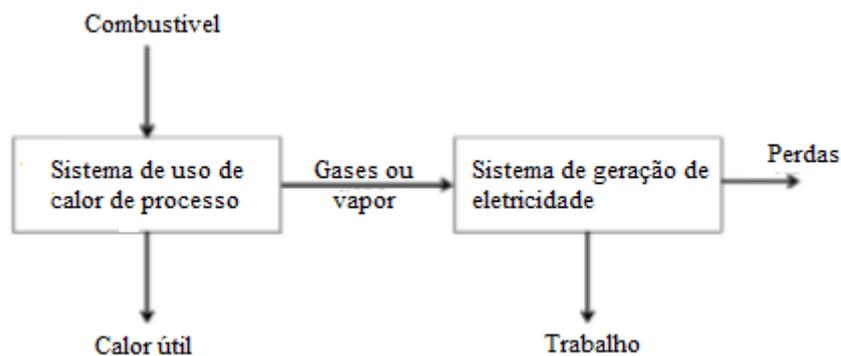
de calor útil, e em seguida, o calor rejeitado da queima do combustível que foi utilizado para a produção de eletricidade é aproveitado como vapor de processo. Já nos sistemas *Bottoming*, o calor da queima do combustível é utilizado primeiramente em um processo térmico da indústria, e a carga térmica residual deste processo é aproveitada em um trocador de calor para geração de vapor que alimentará um turbogerador, produzindo energia elétrica (SANTOS; NOVO, 2008). As formas convencionais de cogeração estão representadas nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Sistema *Topping*.



Fonte: Adaptado de (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Figura 15 – Sistema *Bottoming*.



Fonte: Adaptado de (LORA; NASCIMENTO, 2004).

O sistema mais utilizado na cogeração é o Sistema *Topping*, em virtude das baixas temperaturas do calor rejeitado na maioria dos processos industriais, dificultando a produção de vapor para acionamento de um turbogerador.

A escolha da tecnologia mais adequada a cada aplicação envolve a análise da relação potência e calor de processo, qualidade do combustível e outras variáveis. Contudo, diferentes arranjos de equipamentos podem ser adotados, desde turbinas a vapor acopladas a caldeiras convencionais até sistemas mais complexos com a utilização de gaseificadores em conjunto com sistemas de ciclo combinado (PACHECO; CORREIA, 2015).

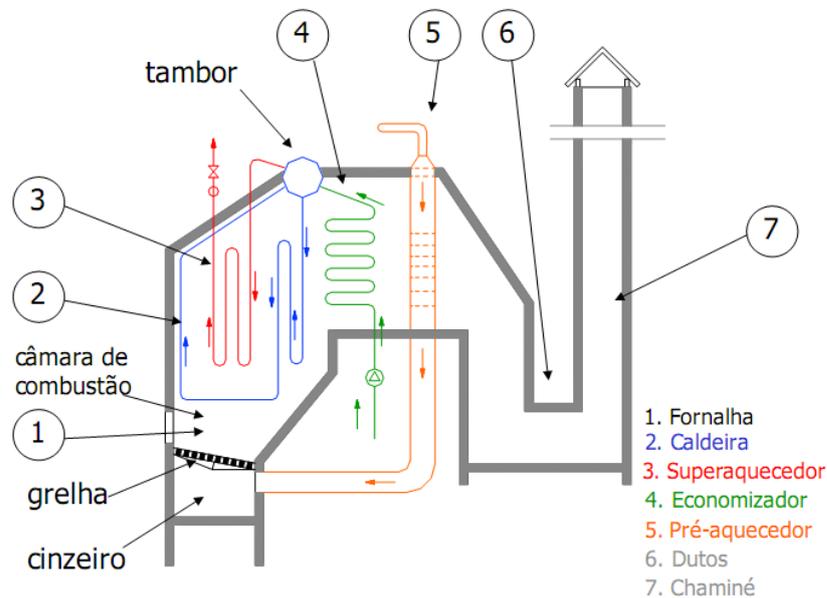
As plantas de cogeração comumente existentes nas usinas sucroenergéticas (instalações de potência a vapor) são concebidas com caldeiras e turbinas a vapor, utilizando o ciclo termodinâmico de Rankine. Os geradores de vapor ou caldeiras são os equipamentos responsáveis pela transferência de calor para o fluido de trabalho (água), a partir dos gases de combustão provenientes da queima dos combustíveis disponíveis (bagaço e palhico). O vapor gerado na caldeira (vapor de alta pressão) é expandido em uma turbina a vapor, podendo ser esta de contrapressão, condensação, e ainda com extração de vapor para o processo. Por sua vez, o trabalho de eixo realizado na turbina aciona o gerador elétrico acoplado, produzindo eletricidade.

As caldeiras podem ser classificadas pela sua finalidade de uso, fonte de aquecimento, tipo de fornalha, pressão de funcionamento, conteúdo nos tubos, etc. Segundo Elektro (2008), classificam-se, de acordo com o conteúdo dos tubos, em flamotubulares e aquatubulares, as caldeiras capazes de gerar vapor através da queima de combustíveis.

Nas caldeiras flamotubulares ou caldeiras de tubos de fumaça, os gases de combustão circulam no interior dos tubos que estão em contato com a água a ser aquecida. Geralmente são caldeiras de pequeno porte e pouco utilizadas em processos de produção de energia elétrica (DEFILIPPI FILHO, 2013; ELEKTRO, 2008; LACERDA, 2015).

Inversamente às flamotubulares, nas caldeiras aquatubulares ou caldeiras de tubos de água, os gases de combustão aquecem a água que circula internamente aos tubos dispostos em feixes ou em paredes de água. Esse tipo de caldeira possui uma capacidade de produção de vapor por unidade de área de troca de calor maior que as caldeiras flamotubulares, produzindo vapores com pressões e temperaturas mais elevadas. As caldeiras aquatubulares são bastante utilizadas em projetos de usinas termelétricas, tendo, também, papel de destaque no setor sucroenergético (DEFILIPPI FILHO, 2013; ELEKTRO, 2008; LACERDA, 2015). Os componentes clássicos desta caldeira são mostrados na Figura 16.

Figura 16 – Componentes clássicos de uma caldeira aquatubular.



Fonte: (PERA, 1990 apud DEFILIPPI FILHO, 2013).

O modo como se dá a queima do combustível na fornalha da caldeira depende da tecnologia de combustão empregada, a qual tem aspecto relevante no desempenho do equipamento, destacando-se as seguintes (LACERDA, 2015):

- Combustão em fornalhas de leito fixo: o combustível é queimado sobre uma grelha fixa ou móvel;
- Combustão em suspensão: o combustível injetado na câmara de combustão entra em combustão antes de atingir a grelha;
- Combustão em leito fluidizado borbulhante: este tipo de caldeira representa a tecnologia mais recente, desenvolvida de forma a possibilitar uma queima com alta eficiência, baixas emissões de poluentes e particulados, além de permitir a queima de uma gama de combustível com alto teor de umidade e de cinzas e baixo poder calorífico inferior. Nestas caldeiras o combustível é queimado sobre um leito inerte de areia em alta temperatura.

Lacerda (2015), afirma em seu estudo de remodelagem de uma usina sucroenergética para o incremento da cogeração de energia, que as caldeiras de leito fluidizado tornam-se soluções tecnologicamente viáveis e eficientes quando objetiva-se um maior aproveitamento

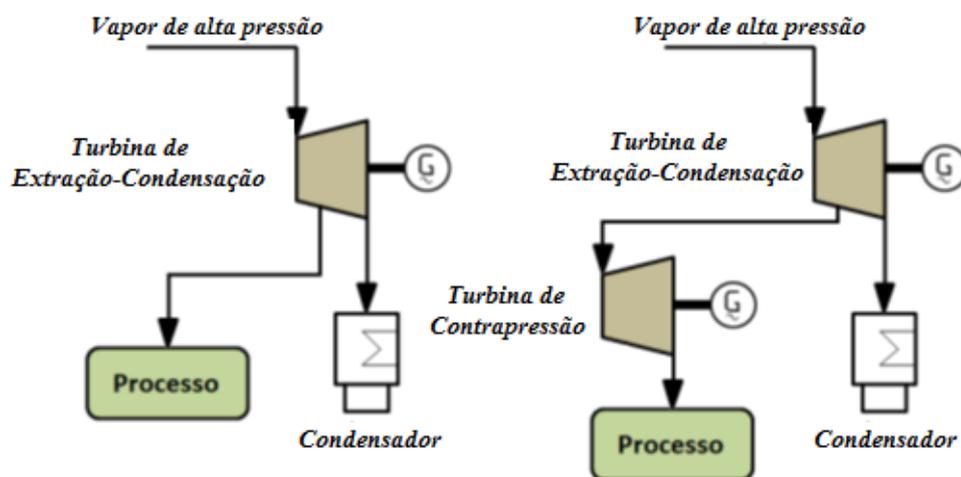
da biomassa da cana-de-açúcar com a queima em maiores proporções do palhicho disponível no campo.

No ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração, o vapor final da realização de trabalho na turbina (vapor de escape) é total ou parcialmente condensado, enquanto que, a parcela de vapor requerida pelos acionamentos mecânicos e demanda térmica do processo produtivo é fornecida por extração do vapor em estágio intermediário da expansão na turbina e pelo vapor de escape das turbinas de contrapressão dos acionamentos mecânicos, conforme ilustrado na Figura 17 (CORRÊA NETO; RAMON, 2002; LACERDA, 2015).

Para Corrêa Neto e Ramon (2002), os sistemas de potência a vapor com turbinas de condensação e extração proporcionam uma maior flexibilidade na cogeração de energia frente aos sistemas de contrapressão pura, pois a geração de vapor deixa de ser condicionada exclusivamente à necessidade do processo, permitindo ao sistema de geração operar no período de entressafra.

A tecnologia tradicional utilizada na cogeração das usinas sucroenergéticas para o autoconsumo emprega processos com equipamento de caldeiras de média pressão (18 a 22 bar) e turbinas de contrapressão, que são utilizadas apenas nos períodos de safra. Para o uso como unidades de geração de energia termelétrica, que operam 365 dias por ano, o processo exige caldeiras de alta pressão e turbinas de condensação (com ou sem extração) de alta pressão e temperatura (pressões acima de 65bar e temperaturas em torno de 520°C) (ALCOOBRÁS, 2003).

Figura 17 – Sistemas de Potência a Vapor operando com turbinas de extração-condensação.



Esta adequação torna o funcionamento do sistema de cogeração de energia elétrica quase autônomo com relação ao processo e, portanto, dá condições para que a planta de cogeração permaneça operante tanto na safra quanto na entressafra, de acordo com a disponibilidade de biomassa a ser queimada nas caldeiras (SEABRA, 2008).

A influência da condição do vapor e do tipo de turbina utilizada na geração de excedentes de energia elétrica foi observada em estudos realizados pelo CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2005 apud CGEE, 2008). A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos em cada caso, nos quais foram mantidos os mesmos parâmetros de processamento de cana-de-açúcar para fins de análise comparativa. Nos casos em que se considera a operação apenas no período da safra, foram utilizadas exclusivamente turbinas de contrapressão, ao passo que, naqueles operantes durante o ano todo foram empregadas turbinas de condensação.

Tabela 7 – Energia elétrica e bagaço excedentes em sistemas de cogeração no setor sucroenergético.

| Parâmetros do sistema de cogeração | | Consumo de vapor (kg/t _{cana}) | Período de geração | Uso do palhiço (%) | Energia elétrica excedente (kWh/t _{cana}) | Bagaço excedente (kg/t _{cana}) |
|------------------------------------|--------|--|--------------------|--------------------|---|--|
| P (bar) | T (°C) | | | | | |
| 21 | 300 | 500 | safra | 0 | 10,4 | 33 |
| 42 | 400 | 500 | safra | 0 | 25,4 | 50 |
| 42 | 450 | 500 | safra | 0 | 28,3 | 48 |
| 65 | 480 | 500 | safra | 0 | 57,6 | 13 |
| 65 | 480 | 350 | safra | 0 | 71,6 | 0 |
| 65 | 480 | 500 | ano todo | 50 | 139,7 | 13 |
| 65 | 480 | 350 | ano todo | 50 | 153,0 | 0 |

Fonte: (CGEE, 2005 apud CGEE, 2008).

Observa-se na Tabela 7, um importante incremento dos excedentes de energia elétrica quando se verifica uma elevação nos níveis de pressão. Além disso, para o contexto avaliado, com a redução do consumo do vapor de processo de 500kg para 350kg por tonelada de cana processada, tem-se um aumento de 24% nos excedentes de energia elétrica, e com a utilização parcial do palhiço, os excedentes se ampliam em 141%.

Vale ainda observar que, atualmente, têm sido implementados sistemas de cogeração no Brasil com caldeiras operando acima de 90 bar, com uma geração estimada, nesses casos, de 146 kWh por tonelada de cana, para a rede elétrica da concessionária (SEABRA, 2008).

Em outro estudo, realizado por Walter e Horta Nogueira (2007 apud CGEE, 2008), indica-se que, considerando a tecnologia mais eficiente ora disponível no âmbito dos sistemas a vapor para as usinas sucroenergéticas – com geração de vapor a 105 bar e 525 °C, redução da demanda de vapor de processo para 280 kg por tonelada de cana, aproveitamento total do bagaço e de 50% do palhiço, com operação durante todo o ano –, seria possível entregar excedentes de 158 kWh por tonelada de cana processada para o Sistema Interligado Nacional.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para investigar a viabilidade do uso do palhiço para geração de energia elétrica, juntamente com o bagaço, em uma usina processadora de cana-de-açúcar com o atual sistema de cogeração em funcionamento na safra, terá como análise primordial os fundamentos da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica. Será considerado no estudo, o atual cenário de cogeração de energia da unidade, tendo como base os dados de produtividade de cana e bagaço na safra 2016/2017, bem como as horas efetivas de moagem e a taxa de bagaço disponível para queima nas caldeiras.

Toda a análise do sistema de cogeração terá como referência a demanda térmica e potência elétrica requeridas pela unidade industrial nas condições de capacidade de processamento de cana atingidas na última safra com todos os cálculos realizados em planilhas do Excel. Para essas condições, a quantidade de vapor gerado total correspondeu a 80,71 kg/s (290,56 t/h), dos quais 80,5 kg/s de vapor foram consumidos no processo industrial e o restante enviado ao desaerador. A demanda de potência elétrica para consumo interno foi de 12,35 MWe. A capacidade nominal instalada de potência elétrica na unidade é de 105,8 MWe.

Atualmente, a usina estudada não recolhe o palhiço remanescente no campo para ser queimado nas caldeiras da indústria, utilizando exclusivamente o bagaço como combustível. Portanto, será avaliada no estudo a capacidade máxima de geração de potência elétrica pela unidade, verificando o montante de energia elétrica passível de ser comercializada com a queima adicional do palhiço ao bagaço de cana.

O aproveitamento do palhiço não deverá interferir nos aspectos físicos, químicos e biológicos do solo para não prejudicar a produção, o manejo e a estabilidade da cultura no meio ambiente, sendo possível e viável o recolhimento de até 50% do palhiço remanescente no campo.

Para análise das propriedades termodinâmicas, cada equipamento do sistema de cogeração é abordado como um volume de controle em regime permanente, ou seja, são regiões delimitadas por uma fronteira prescrita através da qual há fluxo de massa, energia e exergia, e cujos comportamentos não variam com o tempo.

3.1 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE TERMODINÂMICA

3.1.1 Primeira Lei da Termodinâmica

A análise termodinâmica de sistemas de potência e processos térmicos baseia-se nos princípios da conservação de energia e de massa, que correspondem à Primeira Lei da Termodinâmica.

O princípio da conservação de massa analisa, unicamente, o fluxo de massa que está entrando e saindo do volume de controle, e pode ser expresso matematicamente pela Eq.1:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

sendo dm_{VC}/dt a taxa temporal de variação de massa contida no interior do volume de controle no instante t , função das vazões mássicas instantâneas nas entradas (e) e nas saídas (s) da fronteira do volume de controle considerado (MORAN et. al., 2013).

Considerando o processo em regime permanente, isto é, não há variação da massa no interior e na fronteira do volume de controle em função do tempo, a taxa total do fluxo de massa entrando no volume de controle é igual à taxa total do fluxo de massa que sai do volume de controle, como expresso pela Eq.2:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (2)$$

A Primeira Lei estabelece que os únicos caminhos para variar a energia de um sistema fechado são através da transferência de energia por meio de trabalho ou de calor, sendo a energia sempre conservada (MORAN et al., 2013).

A variação da energia total de um sistema é composta por três contribuições macroscópicas, sendo elas: (a) variação de energia cinética, que está associada ao movimento do sistema como um todo em relação a um sistema de eixos coordenados externo; (b) variação

da energia potencial, associada à posição do sistema como um todo no campo gravitacional terrestre; e (c) variação de energia interna, a qual reúne todas as outras variações de energia.

A energia, assim como a massa, é uma propriedade extensiva e, portanto, pode ser transferida para dentro ou para fora de um volume de controle como resultado da massa que atravessa a fronteira (MORAN et al., 2013). Dessa forma, para um volume de controle com vários locais na fronteira através dos quais a massa entra ou sai, o balanço da taxa de energia é dado pela Eq.3:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3)$$

sendo:

g : aceleração gravitacional [m/s²];

h_e : entalpia específica na entrada do volume de controle [kJ/kg];

h_s : entalpia específica na saída do volume de controle [kJ/kg];

\dot{Q}_{VC} : taxa de transferência de calor no volume de controle [kW];

V_e : velocidade do fluxo de massa na entrada do volume de controle [m/s];

V_s : velocidade do fluxo de massa na saída do volume de controle [m/s];

\dot{W}_{VC} : taxa de transferência de energia por trabalho no volume de controle [kW];

z_e : cota na entrada do volume de controle em relação a uma referência [m];

z_s : cota na saída do volume de controle em relação a uma referência [m].

A Eq. 3 enuncia que o aumento ou decréscimo da taxa de energia no interior do volume de controle é igual à diferença entre as taxas de transferência de energia entrando ou saindo ao longo da fronteira, sendo os mecanismos de transferência o calor, o trabalho e a energia que acompanha a massa entrando ou saindo.

Para um volume de controle em regime permanente, a situação da massa em seu interior e em suas fronteiras não se altera com o tempo, bem como as vazões mássicas e as taxas de transferência de energia por calor e trabalho, não existindo acúmulo algum de massa no seu interior (MORAN et al., 2013). Ainda, considerando desprezíveis as variações da energia cinética e potencial entre as entradas e saídas, a Eq.3 pode ser reescrita conforme a Eq.4:

$$\dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (4)$$

A análise da Primeira Lei quanto ao desempenho de um sistema que percorre um ciclo de potência (ou eficiência térmica) é descrita em termos da extensão na qual a energia adicionada por calor (\dot{Q}_e) é convertida em trabalho líquido na saída (\dot{W}_{ciclo}), e pode ser expressa de acordo com a Eq.5 (MORAN et al., 2013):

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{Q}_e} \quad (5)$$

A eficiência termodinâmica para turbinas e bombas (Eq.6), é definida como sendo a razão entre o trabalho realizado no volume de controle e o trabalho que seria produzido em um processo hipotético isentrópico (entropia constante) desde o mesmo estado de entrada até a mesma pressão de saída. Para que um processo seja isentrópico, é necessário que ele seja adiabático e reversível.

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m} \Delta h_{iso}} \quad (6)$$

Para caldeiras convencionais, a eficiência é dada pela Eq.7 (MORAN et al., 2013):

$$\eta_I = \frac{\dot{m}_{vapor} h_{vapor} - \dot{m}_{\acute{a}gua} h_{\acute{a}gua}}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}} \quad (7)$$

3.1.2 Segunda Lei da Termodinâmica

Embora a Primeira Lei seja uma ferramenta poderosa para a análise de sistemas, existem determinados fenômenos de conversão de energia que não podem ser explicados apenas a partir dela, demonstrando que a conversão de calor em trabalho não pode ser realizada completamente, sendo necessária a introdução da Segunda Lei da Termodinâmica (MORAN et al., 2013).

Da mesma forma que massa e energia, a entropia é uma propriedade extensiva, e pode ser transferida através da fronteira do sistema. Para volumes de controle, a transferência de entropia acompanha a transferência de calor e também os fluxos de matéria. Contudo, ao

contrário da massa e da energia, que se conservam, a entropia é gerada no interior de sistemas sempre que estão presentes condições não ideais (irreversibilidades).

De acordo com o enunciado da entropia da Segunda Lei, segundo Moran et al. (2013), a taxa de variação temporal de entropia no interior do volume de controle, dada pela Eq.8, é igual à quantidade líquida de entropia transferida para dentro do volume de controle através da fronteira do sistema somada à quantidade de entropia gerada no interior do volume de controle durante o intervalo de tempo:

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{VC} \quad (8)$$

sendo que os termos $\dot{m}_e s_e$ e $\dot{m}_s s_s$ representam as taxas de transferência de entropia, para dentro e para fora do volume de controle, que acompanham o fluxo de massa; \dot{Q}_j representa a taxa temporal de transferência de calor na posição da fronteira onde a temperatura instantânea é T_j , em que a razão $\frac{\dot{Q}_j}{T_j}$ representa a taxa de transferência de entropia; e $\dot{\sigma}_{VC}$ representa a taxa temporal de geração de entropia no interior do volume de controle devido as irreversibilidades.

Para volumes de controle em regime permanente, a Eq.8 pode ser reescrita como:

$$\sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{VC} = 0 \quad (9)$$

A Eq.9, diferente das Eq.2 e 4, requer que a taxa pela qual a entropia é transferida para fora, deva exceder a taxa pela qual a entropia é admitida, sendo a diferença a taxa de geração de entropia no interior do volume de controle devido às irreversibilidades (MORAN et al., 2013).

Um processo é chamado de irreversível se o sistema e todas as partes que compõem sua vizinhança não puderem ser reestabelecidos exatamente aos seus respectivos estados iniciais após o processo ter ocorrido. Entretanto, um sistema que passou por um processo irreversível não está necessariamente impedido de voltar ao seu estado inicial, mas tendo ele retornado ao seu estado original não seria possível fazer com que a vizinhança retornasse também ao estado em que se encontrava originalmente. Assim, a Segunda Lei pode ser usada para determinar se um dado processo é reversível ou não (MORAN et al., 2013).

A definição de eficiência pela Segunda Lei da Termodinâmica pode ser entendida como o grau de proximidade dos processos reais com relação aos processos reversíveis correspondentes. No centro da análise está o conceito de exergia, definido como o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, à medida que este entra em equilíbrio com o ambiente (MORAN et al., 2013).

Assim, para sistemas energéticos cujos fluxos operam com parâmetros fora das condições do ambiente de referência, a exergia pode ser entendida como a parte da energia que pode ser transformada em trabalho mecânico de forma reversível e útil, sendo a destruição de exergia o resultado direto das irreversibilidades de um sistema (ROCHA, 2010). À medida que o estado do sistema fica mais perto do estado que representa o meio ambiente, as oportunidades de desenvolver trabalho diminuem.

Como a exergia é uma medida do desvio do estado de um sistema quando comparado ao do ambiente, uma vez que o ambiente de referência (ou estado morto) é especificado, pode-se utilizá-lo para calcular a exergia de qualquer outro estado. A exergia não é conservada, mas pode ser destruída pelas irreversibilidades. Neste trabalho adotou-se para o estado morto $T_0 = 298 \text{ K}$ e $P_0 = 101,3 \text{ kPa}$ ($h_0 = 105 \text{ kJ/kg}$, $s_0 = 0,3673 \text{ kJ/kgK}$).

Para um volume de controle em regime permanente o balanço de exergia em termos de taxa pode ser expresso pela Eq.10 como:

$$0 = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_e ex_e - \sum \dot{m}_s ex_s - \dot{E}_d \quad (10)$$

onde o termo $\left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j$ [kW] representa a taxa temporal de transferência de exergia que acompanha a transferência de calor à taxa \dot{Q}_j , que ocorre nos pontos da fronteira em que a temperatura instantânea é T_j ; \dot{W}_{VC} [kW] representa a taxa temporal de transferência de energia por trabalho; $\sum \dot{m}_e ex_e$ e $\sum \dot{m}_s ex_s$ [kW] representam a transferência de exergia com massa entrando e saindo do volume de controle, em que ex_e e ex_s $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$ são conhecidos como exergia específica de fluxo; e \dot{E}_d [kW] leva em conta a taxa temporal de destruição de exergia em virtude das irreversibilidades presentes na região delimitada.

A exergia específica total de um sistema é composta por quatro componentes: exergia cinética, potencial, física e química. Na maioria das análises de sistemas térmicos, os valores das exergias cinética e potencial podem ser desprezados. Por sua vez, a exergia física de um

fluxo é calculada com base num estado de referência restrito (P_0, T_0) onde há equilíbrio térmico e mecânico com o meio, e pode ser expressa conforme a Eq.11:

$$ex_F = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (11)$$

sendo:

h_0 : entalpia específica no estado de referência (P_0, T_0) [kJ/kg];

h : entalpia específica [kJ/kg];

s_0 : entropia específica no estado de referência (P_0, T_0) [kJ/kgK];

s : entropia específica [kJ/kgK];

T_0 : temperatura do estado de referência [K].

Para que haja equilíbrio completo com o meio, o sistema deve estar também em equilíbrio químico (processos que envolvem transferência de calor e de troca de substâncias). A exergia química pode ser obtida através da Eq.12 (FERREIRA, 2008; ROCHA, 2010):

$$ex_g^Q = \sum x_i \bar{e}x_i^Q + \bar{R}T_0 \sum x_i \ln x_i \quad (12)$$

sendo:

\bar{R} : constante universal dos gases [8,3145 kJ/kmol.K];

$\bar{e}x_i^Q$: exergia química padrão de cada componente do gás [kJ/kmol];

x_i : fração molar do componente do gás [%].

O primeiro termo da Eq.12 representa a soma das parcelas das exergias químicas dos componentes do gás em estado puro. O segundo termo desta equação representa a geração de entropia associada ao próprio fato de realizar a mistura e depende da concentração de cada substância presente na mesma.

No cálculo da exergia dos combustíveis (bagaço e palhiço), utiliza-se o modelo proposto por Szargut et al. (1988 apud LACERDA, 2015), na forma de uma equação que correlaciona a exergia química com o poder calorífico inferior do combustível, considerando as frações em massa de oxigênio e carbono, a composição elementar do combustível e o conteúdo de umidade. A exergia específica do combustível pode ser escrita da seguinte forma (Eq. 13):

$$ex_{comb} = \beta(PCI_{comb} + L_{\acute{a}gua}Z_{\acute{a}gua}) + ex_{\acute{a}gua}Z_{\acute{a}gua} \quad (13)$$

sendo:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,2160 \frac{Z_{H_2}}{Z_C} - 0,2499 \frac{Z_{O_2}}{Z_C} \left(1 + 0,7884 \frac{Z_{H_2}}{Z_C}\right) - 0,0450 \frac{Z_{N_2}}{Z_C}}{1 - 0,3035 \frac{Z_{O_2}}{Z_C}} \quad (14)$$

onde:

β : função das frações de massa dos componentes da biomassa;

Z_i : fração em massa do componente i na biomassa [%];

$Z_{\acute{a}gua}$: fração em massa de água na biomassa úmida [%];

PCI_{comb} : poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg];

$L_{\acute{a}gua}$: entalpia de vaporização da água [kJ/kg];

$ex_{\acute{a}gua}$: exergia química da água líquida [kJ/kg].

A exergia analisada para cada volume de controle é obtida a partir da multiplicação entre as exergias específicas e as vazões mássicas associadas a cada elemento pertencente ao volume de controle:

$$\dot{E}_i = \dot{e}x_i \times \dot{m}_i \quad (15)$$

Para o cálculo da eficiência exérgica, Moran et al. (2013) aponta cinco relações para diferentes equipamentos, incluindo a análise para turbinas, bombas, trocadores de calor sem mistura e de contato direto, e caldeiras. Essas relações são apresentadas nas Eq. 16 a 20, respectivamente:

$$\eta_{II_{turb}} = \frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{E}_e - \dot{E}_s} \quad (16)$$

$$\eta_{II_{bomba}} = \frac{\dot{E}_s - \dot{E}_e}{\dot{W}_{VC}} \quad (17)$$

$$\eta_{II_{TC}} = \frac{(\dot{E}_s - \dot{E}_e)_{fria}}{(\dot{E}_s - \dot{E}_e)_{quente}} \quad (18)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{m}_{fria}(ex_s - ex_{fria})}{\dot{m}_{quente}(ex_{quente} - ex_s)} \quad (19)$$

$$\eta_{II_{cald}} = \frac{\dot{E}_{vapor} - \dot{E}_{\acute{a}gua}}{\dot{E}_{comb}} \quad (20)$$

3.2 PANORAMA ATUAL DO ESTUDO DE CASO

A unidade industrial sucroenergética estudada é produtora de açúcar, álcool e bioeletricidade. Localizada no município de Dourados, Estado de Mato Grosso do Sul, a usina tem capacidade para comercializar o excedente de energia elétrica proveniente da queima em suspensão do bagaço em duas caldeiras aquatubulares. A instalação de potência a vapor conta ainda, com duas turbinas, uma de contrapressão e outra de extração-condensação, a presença de um condensador e desaerador, duas bombas de água de alimentação das caldeiras, e uma bomba de água condensada.

Na última safra, 2016/2017, a usina moeu 2.331.120 toneladas de cana-de-açúcar, com destino à produção de açúcar VHP (*Very High Polarization*) e etanol. A produção total de etanol foi de 124.121.522 litros da qual 109.014.731 litros corresponderam à produção de etanol hidratado e 15.106.791 litros de etanol anidro. A produção total de açúcar contabilizou em 56.923 toneladas. As capacidades de processamento da usina estão apresentadas na Tabela 8, e servirão como parâmetros importantes para as análises posteriores.

Uma vez que a produção de bagaço é limitada ao valor estabelecido (655.279 t), qualquer excedente na queima de biomassa será advindo da complementação com palhiço, não acarretando à planta industrial uma demanda de aumento na produção de bagaço.

A quantidade média de palhiço produzida foi estimada tomando como referência a proporção de 140 kg de palhiço seco por tonelada de cana-de-açúcar (HASSUANI; LEAL; MACEDO, 2005). Como o aproveitamento do palhiço não deverá interferir nos aspectos físicos, químicos e biológicos do solo para não prejudicar a produção, o manejo e a estabilidade da cultura no meio ambiente, será estabelecido neste trabalho um percentual de

recolhimento do palhiço de até 50%, resultando em uma disponibilidade líquida desse combustível passível de queima em caldeira em um máximo de 163.178 t.

Tabela 8 – Capacidades de processamento da unidade industrial.

| | Safra 2016/2017 |
|--|----------------------------|
| Cana Moída Total (t) | 2.331.120,093 |
| Produção de açúcar VHP (t) | 56.923,147 |
| Produção de Etanol Hidratado (m ³) | 109.014,73 |
| Produção de Etanol Anidro (m ³) | 15.106,79 |
| Produção de Etanol Total (m ³) | 124.121,52 |
| Horas efetivas de moagem | 4.645,56 |
| Moagem horária (t/h) | 501,79 |
| Bagaço total disponível para queima (t) | 655.279,132 |
| Taxa de bagaço disponível para queima (t/h) | 141,05 |
| Palhiço disponível para queima (t) | 163.178,407 |
| Taxa de palhiço disponível para queima (t/h) | 35,126 |

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com os dados fornecidos pela usina, o período de safra contabilizou em 365 dias, porém com um total de 4.645,56 horas efetivas de moagem ou 193,57 dias efetivos de moagem.

A usina possui duas caldeiras aquatubulares com queima em suspensão, que usam o bagaço como combustível. Ambas tem capacidade de produção de 250 t/h (69,44 kg/s) de vapor, operando à pressão de 10 MPa e temperatura final do vapor superaquecido de 540 °C (estados 12 e 12’).

O vapor gerado nas caldeiras é expandido nas turbinas de contrapressão e extração condensação (estados 1 e 2). Os parâmetros de operação na saída da turbina de contrapressão são determinados pelo processo industrial (0,25 MPa e 137°C) (estado 7). Na turbina de extração-condensação o vapor gerado nas caldeiras é expandido até o estado 6, onde é extraída uma fração do escoamento total para o processo industrial da usina (0,25 MPa e 137°C), e o restante do vapor se expande até o estado 3 (0,01 MPa e 45,81°C). Esta parcela do escoamento é condensada para líquido saturado (estado 4), e em seguida bombeada até a pressão de extração (0,25 MPa) e introduzida no desaerador (estado 5).

O desaerador é um reservatório onde a água tem a sua temperatura elevada, com o objetivo de eliminar os gases não condensáveis presentes. No volume de controle são consideradas as vazões do condensado de processo (estado 9), água de reposição (admite-se

perda de 7% de vapor no processo industrial) (estado 8), condensado bombeado proveniente do condensador (estado 5), e uma parcela de vapor proveniente da linha de vapor a 0,25 MPa e 137°C (estado 13). Para fins de cálculo, o desaerador será abordado como um aquecedor de água de alimentação aberto, isto é, um trocador de calor do tipo contato direto, no qual correntes a diferentes temperaturas se misturam para formar uma corrente a uma temperatura intermediária. Duas correntes misturadas deixam o desaerador à pressão de 0,25 MPa e 120,9°C (estados 10 e 10') e são bombeadas até a pressão das caldeiras, entrando nos geradores de vapor nos estados 11 e 11'.

O escoamento através do gerador de vapor (caldeira), do condensador e do aquecedor de água de alimentação ocorre sem queda de pressão.

As características do bagaço da cana-de-açúcar utilizado na usina estão apresentadas na Tabela 9, bem como as do palhiço a ser recolhido.

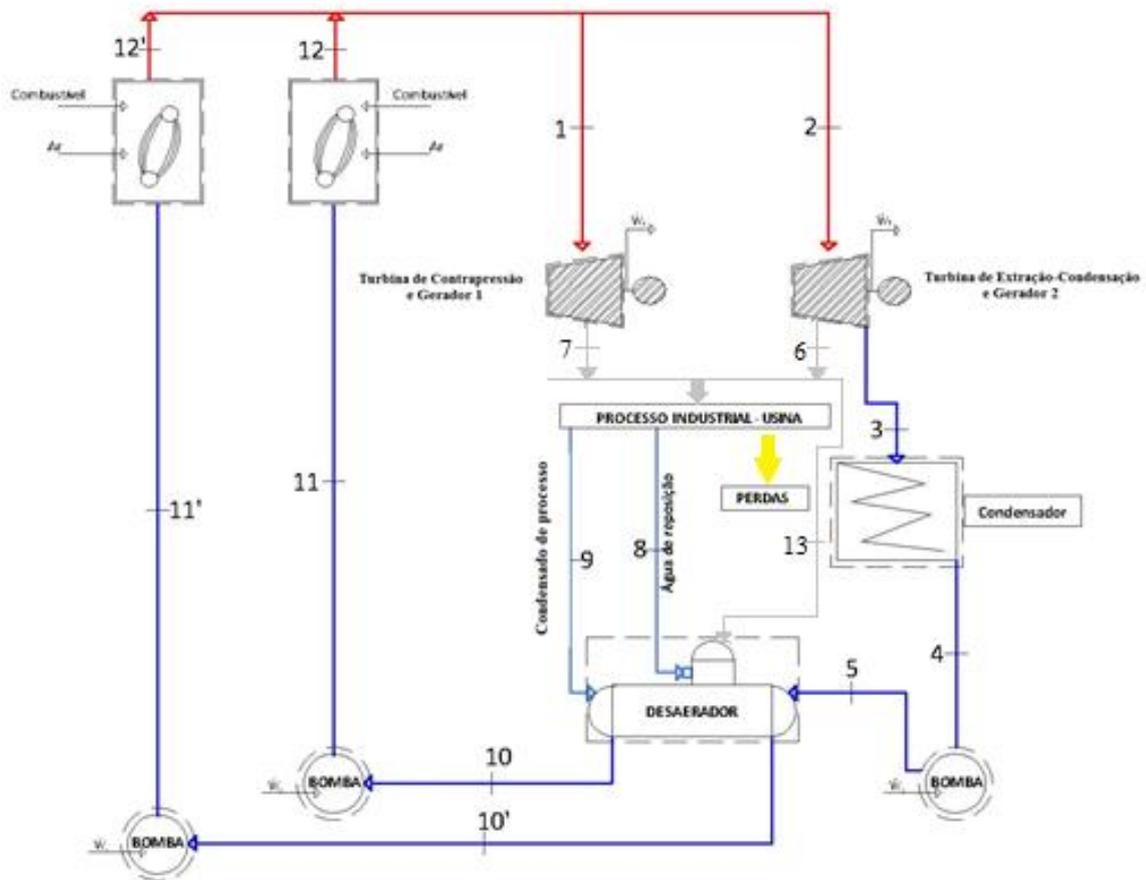
Tabela 9 – Característica do bagaço da cana-de-açúcar.

| | Bagaço | Palhiço |
|-----------------------------------|---------------|----------------|
| Poder Calorífico Inferior (kJ/kg) | 7.165 | 12.989 |
| Umidade (%) | 50 | 15 |
| Carbono (%) | 45,6 | 47,9 |
| Hidrogênio (%) | 5,8 | 6,4 |
| Oxigênio (%) | 48,2 | 44,7 |
| Nitrogênio (%) | 0,4 | 0,6 |

Fonte: Adaptado de (LINERO 2012 apud DEFILIPPI 2013).

A configuração do sistema de cogeração de energia da usina é apresentada na Figura 18. As propriedades termodinâmicas (a partir do programa *Computer Aided Thermodynamic Tables 3 – CATT*) para cada ponto estabelecido na Figura 18, bem como as vazões mássicas, estão apresentadas na Tabela 10.

Figura 18 – Fluxograma do sistema de cogeração instalado na unidade industrial.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10 – Propriedades termodinâmicas dos estados do ciclo a vapor, e parâmetros característicos da planta industrial operando na safra 2016/2017.

(continua)

| Pontos | Fase do fluido | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) |
|--------|-----------------------|---------|--------|-----------|------------|------------------|
| 1 | Vapor superaquecido | 10 | 540 | 3476 | 6,725 | 80,71 |
| 2 | Vapor superaquecido | 10 | 540 | 3476 | 6,725 | 0 |
| 3 | Mistura líquido vapor | 0,01 | 45,81 | 2435 | 7,68 | 0 |
| 4 | Líquido saturado | 0,01 | 45,81 | 191,8 | 0,6492 | 0 |
| 5 | Líquido comprimido | 0,25 | 45,83 | 192,1 | 0,6494 | 0 |
| 6 | Vapor superaquecido | 0,25 | 137 | 2737 | 7,103 | 0 |
| 7 | Vapor superaquecido | 0,25 | 137 | 2737 | 7,103 | 80,71 |
| 8 | Líquido comprimido | 0,25 | 25 | 105,1 | 0,3673 | 5,635 |
| 9 | Líquido comprimido | 0,25 | 124,33 | 522,1 | 1,574 | 74,865 |
| 10 | Líquido comprimido | 0,25 | 120,9 | 507,37 | 1,537 | 40,355 |
| 10' | Líquido comprimido | 0,25 | 120,9 | 507,37 | 1,537 | 40,355 |
| 11 | Líquido comprimido | 10 | 122,1 | 519,54 | 1,541 | 40,355 |
| 11' | Líquido comprimido | 10 | 122,1 | 519,54 | 1,541 | 40,355 |
| 12 | Vapor superaquecido | 10 | 540 | 3476 | 6,725 | 40,355 |

Tabela 10 – Propriedades termodinâmicas dos estados do ciclo a vapor, e parâmetros característicos da planta industrial operando na safra 2016/2017.

| | | | | | | (conclusão) |
|--------|---------------------|---------|--------|-----------|------------|------------------|
| Pontos | Fase do fluido | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) |
| 12' | Vapor superaquecido | 10 | 540 | 3476 | 6,725 | 40,355 |
| 13 | Vapor superaquecido | 0,25 | 137 | 2737 | 7,103 | 0,21 |

Fonte: Elaborado pela autora.

Algumas premissas serão apresentadas para fins de cálculos e entendimento de como alguns parâmetros foram determinados para análise do sistema de cogeração.

Com base nos dados apresentados pelo relatório gerencial industrial da usina da safra 2016/2017 (Tabela 8), a demanda térmica pelo processo industrial foi igual ao total de vapor gerado pelas caldeiras (1.349.801 t) descontado a injeção de vapor a baixa pressão no desaerador. Fazendo uso dessa informação e das horas efetivas de moagem, a vazão de vapor gerada nas caldeiras foi determinada (290,56 t/h ou 80,71 kg/s). Como a capacidade de produção das caldeiras é de 250 t/h de vapor, sabe-se que as duas caldeiras devem estar operando. Admite-se, portanto, que cada caldeira irá gerar 40,355 kg/s de vapor (145,28 t/h). Conclui-se também, em função da vazão de vapor gerado e da vazão demandada pelo processo industrial, que apenas a turbina de contrapressão está operando.

Admitindo eficiência térmica de 85% para as caldeiras (MORAN et al., 2013) e tendo como base a Eq. 7, foi determinada a entalpia da água nos estados 11 e 11'. Conhecendo essa propriedade foi possível determinar a temperatura da água na entrada das caldeiras, além de permitir encontrar as propriedades termodinâmicas dos demais pontos do ciclo a vapor aos quais não foi disponibilizado o acesso. Todas essas informações estão apresentadas na Tabela 10.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONFIGURAÇÃO ATUAL: QUEIMA EXCLUSIVA DE BAGAÇO NOS GERADORES DE VAPOR

4.1.2 Turbina a vapor de contrapressão

As exergias na turbina a vapor de contrapressão estão associadas aos fluxos de vapor na entrada (ponto 1) e saída (ponto 7) da fronteira do volume de controle (Eq. 11 e 15). Para esta configuração, o vapor de entrada na turbina corresponde às parcelas de vapor gerado pelas duas

caldeiras. Para o cálculo da taxa de exergia destruída na turbina, considerar-se-á que não há transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira. Portanto, além das exergias associadas aos fluxos de vapor na entrada e saída, deve-se considerar a transferência de energia por trabalho (Eq. 10). Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para a turbina de contrapressão.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | m (kg/s) | ex_F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{W}_t (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|--------|------------|-----------|--------------|---------------|-------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 1 | 10 | 540 | 3476 | 6,725 | 80,71 | 1.476,41 | 119.161,18 | 59.644,94 | 9.091,54 |
| 7 | 0,25 | 137 | 2737 | 7,103 | 80,71 | 624,76 | 50.424,70 | | |

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência exergética calculada para a turbina (Eq. 19) revelou uma eficácia de 86,77% na conversão da exergia transportada para o sistema associada ao fluxo de vapor em trabalho. Consequentemente, a outra parcela do potencial máximo disponível para o desenvolvimento de trabalho foi destruída devido às irreversibilidades do sistema.

4.1.3 Desaerador (trocador de calor de contato direto)

Admitindo que não exista transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira do sistema, a formulação do balanço da taxa de exergia em regime permanente se reduz às parcelas de exergia de fluxo entre as entradas e saídas do volume de controle (Eq.10).

Para esta configuração, têm-se como entradas os pontos 8, 9 e 13, e como saídas, os pontos 10 e 10'. Como os pontos de saída apresentam as mesmas características, considerou-se uma única saída somada as vazões. Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 12.

A eficiência exergética calculada para o desaerador (Eq.19) revelou uma eficácia de 76,18% no aumento de exergia da corrente fria entre a entrada e a saída do volume de controle. As correntes quentes são quem fornecem o aumento de exergia à corrente fria, e também, são as responsáveis pela destruição de exergia pelas irreversibilidades.

Tabela 12 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para o desaerador.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) | ex (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|----------|---------|--------|-----------|------------|------------------|------------|----------------|------------------|
| 8 | 0,25 | 25 | 105,1 | 0,3673 | 5,635 | 0,10 | 0,56 | |
| 9 | 0,25 | 124,33 | 522,1 | 1,574 | 74,865 | 57,50 | 4.304,99 | |
| 10 + 10' | 0,25 | 120,9 | 507,37 | 1,537 | 80,71 | 53,80 | 4.342,15 | 94,61 |
| 13 | 0,25 | 137 | 2737 | 7,103 | 0,21 | 624,76 | 131,20 | |

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.4 Bombas de água de alimentação

O sistema de cogeração opera com duas bombas de água de alimentação com as mesmas características de trabalho. Admitindo que não exista transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira do sistema, a formulação do balanço da taxa de exergia em regime permanente se reduz às parcelas de exergia de fluxo entre a entrada (ponto 10 ou 10') e saída (ponto 11 ou 11') do volume de controle e à transferência de energia por trabalho (Eq.10). Assim, a entrada de trabalho nesse dispositivo é responsável por um aumento da exergia de fluxo entre a entrada e a saída ou pela destruição de exergia. Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para as bombas de água de alimentação.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) | ex_F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{W}_b (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|--------|---------|--------|-----------|------------|------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 10/10' | 0,25 | 120,9 | 507,37 | 1,537 | 40,355 | 53,80 | 2.171,07 | | |
| 11/11' | 10 | 122,1 | 519,54 | 1,541 | 40,355 | 64,78 | 2.614,09 | 491,12 | 48,10 |

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência exergetica calculada para cada bomba (Eq.17) revelou uma eficácia de 90,21% na conversão da entrada de trabalho no dispositivo em aumento de exergia de fluxo, sendo a parcela restante destruída devido às irreversibilidades presentes no volume de controle.

4.1.5 Caldeiras

O sistema de cogeração opera com duas caldeiras aquatubulares com as mesmas características de trabalho. As entradas e saídas consideradas na análise do volume de controle para a caldeira, bem como seus valores de vazão, pressão e temperatura, são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Propriedades das entradas e saídas da caldeira.

| | Descrição | P (MPa) | T (°C) | \dot{m} (kg/s) |
|---------|---------------------|---------|--------|------------------|
| ENTRADA | Combustível | 0,1 | 25 | 19,59 |
| | Água de alimentação | 10 | 122,1 | 40,355 |
| SAÍDA | Vapor | 10 | 540 | 40,355 |

Fonte: Elaborado pela autora.

No balanço de exergia para a caldeira são avaliadas as exergias na entrada associadas ao bagaço e à água de alimentação (pontos 11/11') e a exergia na saída, associada ao vapor (pontos 12/12'). Para o cálculo da exergia do bagaço de cana são utilizadas as Eq. 13 e 14, tomando como referência as características do bagaço apresentadas na Tabela 9. Admitindo que o bagaço entre na caldeira a 0,1 MPa e 25°C, e que a entalpia de vaporização da água nessas condições é de 2.442,1 kJ/kg, sendo a exergia química da água líquida de 50kJ/kg, a exergia do bagaço foi calculada, bem como as exergias de fluxo na entrada e saída das caldeiras. Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 15 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para as caldeiras.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) | ex_F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|--------|---------|--------|-----------|------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| 11/11' | 10 | 122,1 | 519,54 | 1,541 | 40,355 | 64,78 | 2.614,10 | |
| 12/12' | 10 | 540 | 3476 | 6,725 | 40,355 | 1.476,41 | 59.580,59 | 131.618,08 |
| Bagaço | 0,1 | 25 | - | - | 19,59 | 9.626,57 | 188.584,57 | |

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência exergética calculada para cada caldeira (Eq. 20) revelou uma eficácia de 30,21% na conversão do potencial máximo de exergia disponível do bagaço em aumento de exergia da corrente de água, isto é, do total de 188,6 MW de exergia disponível apenas 56,97 MW de exergia foi aproveitado pela corrente de água, sendo a parcela restante de exergia destruída devido às irreversibilidades do sistema.

4.1.6 Eficiência global do sistema

A eficiência global da planta pela Primeira Lei da Termodinâmica deve considerar as potências de eixo produzidas para os acionamentos dos geradores elétricos disponível para exportação, dada pela potência total gerada descontando-se as potências consumidas relativas ao bombeamento de água das caldeiras e a consumida pela usina, a potência térmica útil no processo para o sistema de evaporação da água do caldo e a energia proveniente da queima do combustível, conforme a Eq.21:

$$\eta_{global} = \frac{\dot{W}_{ger,ele} + \dot{Q}_{útil} - \dot{W}_{bomba} - \dot{W}_{consumo}}{\dot{m}_{comb}PCI} \quad (21)$$

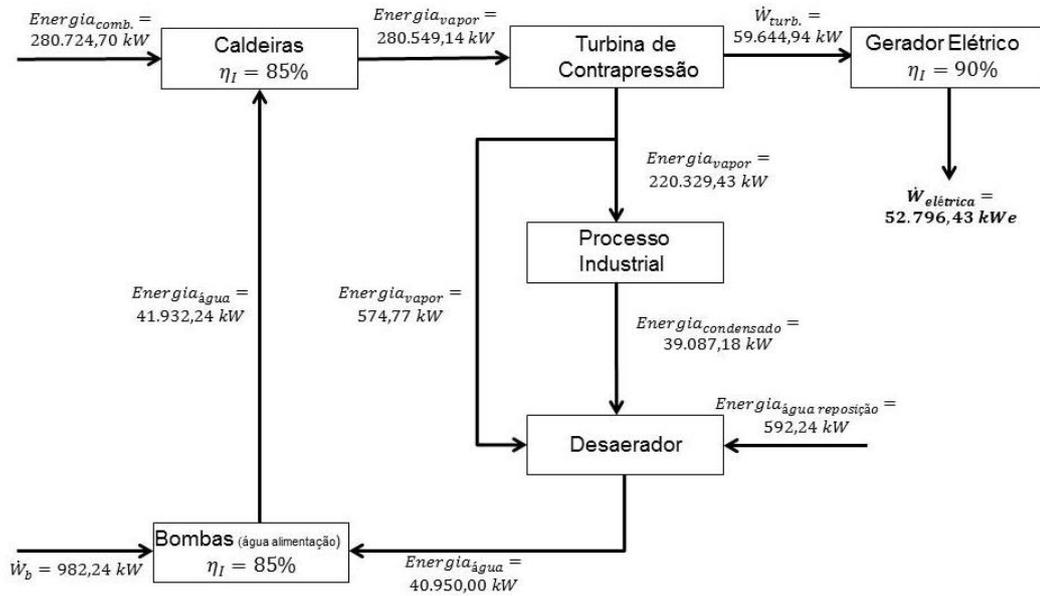
Nessas condições, a eficiência global do ciclo resultou em 77,51%, representando o aproveitamento líquido da energia do combustível.

A potência elétrica gerada, considerando uma eficiência do gerador de 90%, é de 52,8 MWe. Para as condições apresentadas, referentes à última safra, o consumo interno de potência elétrica foi de 12,35 MWe ou 108.186 MWh de energia elétrica, e, portanto, um excedente de 40,45 MWe (354.310 MWh) passível de ser comercializado.

A eficiência global do sistema pela Segunda Lei da Termodinâmica relaciona a soma de potência elétrica produzida pelo sistema com a exergia produzida pelo processo, e a exergia do combustível. Para a configuração atual, a eficácia global do sistema pela Segunda Lei corresponde a 27,37%.

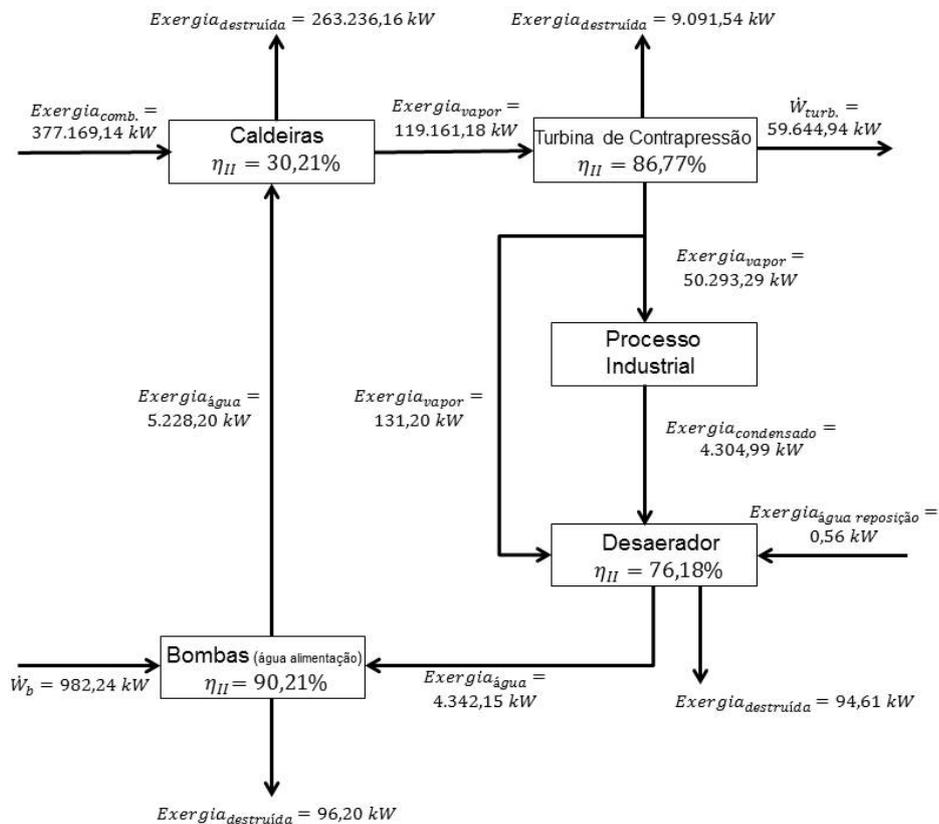
Nas Figuras 19 e 20 são apresentados os fluxogramas de energia e exergia, respectivamente, referentes ao sistema de cogeração no cenário atual, permitindo uma visão mais clara das perdas no ciclo de potência, devido às irreversibilidades presentes no sistema, bem como o real aproveitamento de toda a energia química contida no bagaço a ser queimado convertida em energia térmica requerida pelo processo industrial da usina e potência elétrica gerada no gerador elétrico da unidade.

Figura 19 – Fluxograma de energia do sistema de cogeração no cenário atual.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 – Fluxograma de exergia do sistema de cogeração no cenário atual.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 CONFIGURAÇÃO PROPOSTA: QUEIMA ADICIONAL DO PALHIÇO AO BAGAÇO NOS GERADORES DE VAPOR.

Na configuração proposta tem-se a queima adicional do palhiço disponível ao bagaço de cana. As propriedades termodinâmicas para cada volume de controle são as mesmas, bem como o demanda térmica do processo (80,50 kg/s) e consumo interno de eletricidade (12,35 MWe). Todavia, as variáveis se concentram nas vazões de combustíveis e vapor gerado, e geração de potência elétrica, interferindo diretamente no balanço de exergia e eficiência exérgica para cada volume de controle, bem como no desempenho global do sistema de cogeração.

A princípio, considerar-se-á a queima total do palhiço disponível e 97,4% do bagaço disponível nessa safra, em função da unidade industrial já possuir um pátio de estocagem para o bagaço. Essa relação de porcentagem foi estabelecida em função da queima integral do bagaço com o palhiço (48,94 kg/s), considerando poder calorífico inferior médio para a queima conjunta dos combustíveis (PCI = 10.077 kJ/kg) e eficiência térmica de 85% para as caldeiras, gerar uma quantidade superior de vapor (141,79 kg/s) à capacidade nominal de produção das caldeiras existentes (69,44 kg/s, totalizando 138,88 kg/s). O vapor gerado pela queima integral do bagaço e palhiço disponíveis (Tabela 8), excede em 2,1% a capacidade nominal das caldeiras. Para essa situação, a quantidade de bagaço a ser estocado (17037,26 toneladas), poderá ser queimada independentemente do processamento e moagem da cana estarem ativos, destinando a produção de vapor exclusivamente à geração de energia elétrica excedente ou ainda, ser armazenado para queima na partida das caldeiras na próxima safra.

Frente às observações, a vazão total de combustível (palhiço + bagaço) a ser queimado se reduz à 47,94 kg/s, tendo o palhiço a participação de 20% do total, devido a sua disponibilidade em massa na usina ser inferior à do bagaço. As propriedades termodinâmicas dos estados do ciclo a vapor, e parâmetros característicos da planta industrial com a queima adicional do palhiço estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades termodinâmicas dos estados do ciclo a vapor, e parâmetros característicos da planta industrial com a queima adicional do palhiço.

| (continua) | | | | | | |
|------------|-----------------------|---------|--------|-----------|------------|------------------|
| Pontos | Fase do fluido | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) |
| 1 | Vapor superaquecido | 10 | 540 | 3.476 | 6,725 | 74,72 |
| 2 | Vapor superaquecido | 10 | 540 | 3.476 | 6,725 | 64,17 |
| 3 | Mistura líquido vapor | 0,01 | 45,81 | 2.435 | 7,68 | 53,39 |
| 4 | Líquido saturado | 0,01 | 45,81 | 191,8 | 0,6492 | 53,39 |

Tabela 16 – Propriedades termodinâmicas dos estados do ciclo a vapor, e parâmetros característicos da planta industrial com a queima adicional do palhão.

| | | | | | | | (conclusão) |
|--------|---------------------|---------|--------|-----------|------------|------------------|-------------|
| Pontos | Fase do fluido | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) | |
| 5 | Líquido comprimido | 0,25 | 45,83 | 192,1 | 0,6494 | 53,39 | |
| 6 | Vapor superaquecido | 0,25 | 137 | 2.737 | 7,103 | 10,78 | |
| 7 | Vapor superaquecido | 0,25 | 137 | 2.737 | 7,103 | 74,72 | |
| 8 | Líquido comprimido | 0,25 | 25 | 105,1 | 0,3673 | 5,635 | |
| 9 | Líquido comprimido | 0,25 | 124,33 | 522,1 | 1,574 | 74,87 | |
| 10 | Líquido comprimido | 0,25 | 120,9 | 507,37 | 1,537 | 69,44 | |
| 10' | Líquido comprimido | 0,25 | 120,9 | 507,37 | 1,537 | 69,44 | |
| 11 | Líquido comprimido | 10 | 122,1 | 519,54 | 1,541 | 69,44 | |
| 11' | Líquido comprimido | 10 | 122,1 | 519,54 | 1,541 | 69,44 | |
| 12 | Vapor superaquecido | 10 | 540 | 3.476 | 6,725 | 69,44 | |
| 12' | Vapor superaquecido | 10 | 540 | 3.476 | 6,725 | 69,44 | |
| 13 | Vapor superaquecido | 0,25 | 137 | 2.737 | 7,103 | 5,00 | |

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1 Turbina a vapor de contrapressão

As exergias na turbina a vapor de contrapressão estão associadas aos fluxos de vapor na entrada (ponto 1) e saída (ponto 7) da fronteira do volume de controle (Eq. 11 e 15). Para esta configuração, o vapor de entrada na turbina corresponde à parcela de 53,8% do vapor gerado pelas duas caldeiras. Para o cálculo da taxa de exergia destruída na turbina, considerar-se-á que não há transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira. Portanto, além das exergias associadas aos fluxos de vapor na entrada e saída, deve-se considerar a transferência de energia por trabalho (Eq. 10). Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para a turbina de contrapressão.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) | ex_F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{W}_t (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|--------|---------|--------|-----------|------------|------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 1 | 10 | 540 | 3.476 | 6,725 | 74,72 | 1.476,41 | 110.320,29 | 55.219,72 | 8.417,01 |
| 7 | 0,25 | 137 | 2.737 | 7,103 | 74,72 | 624,76 | 46.683,56 | | |

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência exérgica calculada para a turbina (Eq. 19) revelou uma eficácia de 86,77% na conversão da exergia transportada para o sistema associada ao fluxo de vapor em

trabalho. Consequentemente, a outra parcela do potencial máximo disponível para o desenvolvimento de trabalho foi destruída devido às irreversibilidades do sistema.

4.2.2 Turbina de extração-condensação

As exergias na turbina a vapor de extração-condensação estão associadas aos fluxos de vapor na entrada (ponto 2) e saídas (pontos 3 e 6) da fronteira do volume de controle (Eq. 11 e 15). Para esta configuração, o vapor de entrada na turbina corresponde à parcela de 46,2% do vapor gerado pelas duas caldeiras. Para o cálculo da taxa de exergia destruída na turbina, considerar-se-á que não há transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira. Portanto, além das exergias associadas aos fluxos de vapor na entrada e saídas, deve-se considerar a transferência de energia por trabalho (Eq. 10). Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para a turbina de extração-condensação.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | ṁ (kg/s) | ex_F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{W}_t (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|--------|---------|--------|-----------|------------|-----------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 2 | 10 | 540 | 3.476 | 6,725 | 64,17 | 1.476,41 | 94.736,01 | | |
| 3 | 0,01 | 45,81 | 2.435 | 7,680 | 53,39 | 150,82 | 8.051,87 | 63.542,61 | 16.408 |
| 6 | 0,25 | 137 | 2.737 | 7,103 | 10,78 | 624,76 | 6.733,54 | | |

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência exérgica calculada para a turbina (Eq. 19) revelou uma eficácia de 79,48% na conversão da exergia transportada para o sistema associada ao fluxo de vapor em trabalho. Consequentemente, a outra parcela do potencial máximo disponível para o desenvolvimento de trabalho foi destruída devido às irreversibilidades do sistema.

4.2.3 Bombas de água de alimentação

O sistema de cogeração opera com duas bombas de água de alimentação com as mesmas características de trabalho. Admitindo que não exista transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira do sistema, a formulação do balanço da taxa de exergia em regime permanente se reduz às parcelas de exergia de fluxo entre a entrada (ponto 10 ou 10') e saída (ponto 11 ou 11') do volume de controle e à transferência de energia por

trabalho (Eq. 10). Assim, a entrada de trabalho nesse dispositivo é responsável por um aumento da exergia de fluxo entre a entrada e a saída ou pela destruição de exergia. Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para as bombas de água de alimentação.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | m (kg/s) | ex_F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{W}_b (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|--------|------------|-----------|--------------|---------------|-------------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 10/10' | 0,25 | 120,9 | 507,37 | 1,537 | 69,44 | 53,80 | 3.736,07 | 845,14 | 82,78 |
| 11/11' | 10 | 122,1 | 519,54 | 1,541 | 69,44 | 64,78 | 4.498,43 | | |

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência exergética calculada para cada bomba (Eq. 17) revelou uma eficácia de 90,21% na conversão da entrada de trabalho no dispositivo em aumento de exergia de fluxo, sendo a parcela restante destruída devido às irreversibilidades presentes no volume de controle.

4.4.4 Bomba de condensado

O sistema de cogeração opera com uma bomba de condensado responsável por bombear o líquido saturado na saída do condensador, até o desaerador, aonde irá se misturar às vazões de água de reposição, vapor de extração e condensado de processo. Admitindo que não exista transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira do sistema, a formulação do balanço da taxa de exergia em regime permanente se reduz às parcelas de exergia de fluxo entre a entrada (ponto 4) e saída (ponto 5) do volume de controle e à transferência de energia por trabalho (Eq. 10). A entrada de trabalho nesse dispositivo é responsável por um aumento da exergia de fluxo entre a entrada e a saída ou pela destruição de exergia. Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 20.

A eficiência exergética calculada para a bomba de condensado (Eq.17) revelou uma eficácia de 80,13% na conversão da entrada de trabalho no dispositivo em aumento de exergia de fluxo, sendo a parcela restante destruída devido às irreversibilidades presentes no volume de controle.

Tabela 20 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para a bomba de condensado.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | ṁ (kg/s) | ex _F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{W}_b (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|--------|---------|--------|-----------|------------|-----------|-------------------------|----------------|------------------|------------------|
| 4 | 0,01 | 45,81 | 191,8 | 0,6492 | 53,39 | 2,7938 | 149,16 | 16,02 | 3,18 |
| 5 | 0,25 | 45,83 | 192,1 | 0,6494 | 53,39 | 3,0342 | 161,99 | | |

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.5 Caldeiras

O sistema de cogeração opera com duas caldeiras aquatubulares com as mesmas características de trabalho. As entradas e saídas consideradas na análise do volume de controle para a caldeira, bem como seus valores de vazão, pressão e temperatura, são apresentadas na Tabela 21.

No balanço de exergia para a caldeira são avaliadas as exergias na entrada associadas ao combustível (bagaço e palhiço) e à água de alimentação (pontos 11/11') e a exergia na saída, associada ao vapor (pontos 12/12'). Para o cálculo da exergia do bagaço e palhiço são utilizadas as Eq. 13 e 14, tomando como referência as características dos combustíveis apresentadas na Tabela 9. Admitindo que o combustível entre na caldeira a 0,1 MPa e 25°C, e que a entalpia de vaporização da água nessas condições é de 2.442,1 kJ/kg, sendo a exergia química da água líquida de 50kJ/kg, a exergia do bagaço e do palhiço foi calculada, bem como as exergias de fluxo na entrada e saída da caldeira. Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 21 – Propriedades das entradas e saídas da caldeira.

| | Descrição | P (MPa) | T (°C) | ṁ (kg/s) | |
|---------|---------------------|---------|--------|-----------|-------|
| ENTRADA | Combustível | Bagaço | 0,1 | 25 | 19,09 |
| | | Palhiço | 0,1 | 25 | 4,88 |
| | Água de alimentação | 10 | 122,1 | 69,44 | |
| SAÍDA | Vapor | 10 | 540 | 69,44 | |

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 22 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para as caldeiras.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) | ex_F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|---------|---------|--------|-----------|------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| 11/11' | 10 | 122,1 | 519,54 | 1,541 | 69,44 | 64,78 | 4.498,43 | |
| 12/12' | 10 | 540 | 3.476 | 6,725 | 69,44 | 1.476,41 | 102.528,15 | |
| Bagaço | 0,1 | 25 | - | - | 19,09 | 9.626,57 | 183.780,47 | 159.573,05 |
| Palhiço | 0,1 | 25 | - | - | 4,88 | 15.131,97 | 73.822,30 | |

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência exergética calculada para cada caldeira (Eq. 20) revelou uma eficácia de 38,05% na conversão do potencial máximo de exergia disponível do combustível (bagaço e palhiço misturados) em aumento de exergia da corrente de água, isto é, do total de 257,6 MW de exergia disponível apenas 98,03 MW de exergia foi aproveitado pela corrente de água, sendo a parcela restante de exergia destruída devido às irreversibilidades do sistema.

A exergia específica do palhiço com 15% de umidade é 57% superior à exergia do bagaço com 50% de umidade, refletindo em um aumento de 69.018,20 kW no potencial máximo de exergia disponível quando comparado à queima exclusiva do bagaço, e um incremento de 8% na exergia associada à corrente de água.

4.4.6 Desaerador

Admitindo que não exista transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira do sistema, a formulação do balanço da taxa de exergia em regime permanente se reduz às parcelas de exergia de fluxo entre as entradas e saídas do volume de controle (Eq. 10).

Para esta configuração, têm-se como entradas os pontos 5, 8, 9 e 13, e como saídas, os pontos 10 e 10'. Como os pontos de saída apresentam as mesmas características, considerou-se uma única saída somada as vazões. Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 23.

A eficiência exergética calculada para o desaerador (Eq. 19) revelou uma eficácia de 96,19% no aumento de exergia das corrente frias entre a entrada e a saída do volume de controle. As correntes quentes são quem fornecem o aumento de exergia às correntes frias, e também, são as responsáveis pela destruição de exergia pelas irreversibilidades.

Tabela 23 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para o desaerador.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) | ex (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|----------|---------|--------|-----------|------------|------------------|------------|----------------|------------------|
| 5 | 0,25 | 45,83 | 192,1 | 0,6494 | 53,39 | 3,034 | 161,99 | |
| 8 | 0,25 | 25 | 105,1 | 0,3673 | 5,635 | 0,10 | 0,56 | |
| 9 | 0,25 | 124,33 | 522,1 | 1,5740 | 74,87 | 57,50 | 4.304,99 | 119,22 |
| 13 | 0,25 | 137 | 2.737 | 7,1030 | 5,00 | 624,76 | 3.123,81 | |
| 10 + 10' | 0,25 | 120,9 | 507,37 | 1,5370 | 138,88 | 53,80 | 7.472,14 | |

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.7 Condensador

Admitindo que não exista transferência de exergia por transferência de calor nos pontos da fronteira do sistema, a formulação do balanço da taxa de exergia em regime permanente se reduz às parcelas de exergia de fluxo entre as entradas e saídas do volume de controle (Eq. 10).

Para esta configuração, têm-se como entradas a mistura líquido vapor resultante do máximo estágio de expansão da turbina de extração-condensação, e a água líquida a 30°C proveniente das torres de resfriamento da usina; como saídas, considerou-se a água no seu estado de líquido saturado pertencente ao ciclo a vapor, e a água líquida a 38°C pertencente ao ciclo das torres de resfriamento. Os parâmetros da água das torres de resfriamento foram considerados para análise do desempenho do sistema pela Segunda Lei. Os valores de exergia de fluxo e exergia destruída estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Propriedades termodinâmicas e balanço de exergia para o condensador.

| Pontos | P (MPa) | T (°C) | h (kJ/kg) | s (kJ/kgK) | \dot{m} (kg/s) | ex_F (kJ/kg) | \dot{E} (kW) | \dot{Q}_s (kW) | \dot{E}_d (kW) |
|----------------------|---------|--------|-----------|------------|------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 3 | 0,01 | 45,81 | 2.435 | 7,6800 | 53,39 | 150,82 | 8.051,87 | | |
| 4 | 0,01 | 45,81 | 191,8 | 0,6492 | 53,39 | 2,79 | 149,16 | 119.761,96 | |
| água torre (e) | 0,01 | 30 | 125,8 | 0,4369 | 3.585,69 | 0,06 | 212,27 | - | 4.397,34 |
| água torre (s) | 0,01 | 38 | 159,2 | 0,5457 | 3.585,69 | 1,04 | 3.717,64 | - | |

Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência exergetica calculada para o condensador (Eq. 18) revelou uma eficácia de 44,36% no aumento da exergia da corrente fria entre a entrada e a saída do volume de

controle. A corrente quente é quem fornece o aumento de exergia à corrente fria, e também, a responsável pela destruição de exergia pelas irreversibilidades.

4.4.8 Eficiência global do sistema

A eficiência global da planta pela Primeira Lei da Termodinâmica deve considerar as potências de eixo produzidas para os acionamentos dos geradores elétricos disponível para exportação, dada pela potência total gerada descontando-se as potências consumidas relativas ao bombeamento de água das caldeiras e a consumida pela usina, a potência térmica útil no processo para o sistema de evaporação da água do caldo e a perda no condensador e a energia proveniente da queima do combustível, conforme a Eq. 22:

$$\eta_{global} = \frac{\dot{W}_{ger,ele} + \dot{Q}_{útil} - \dot{W}_{bomba} - \dot{W}_{consumo} - \dot{Q}_{condensador}}{\dot{m}_{comb}PCI} \quad (22)$$

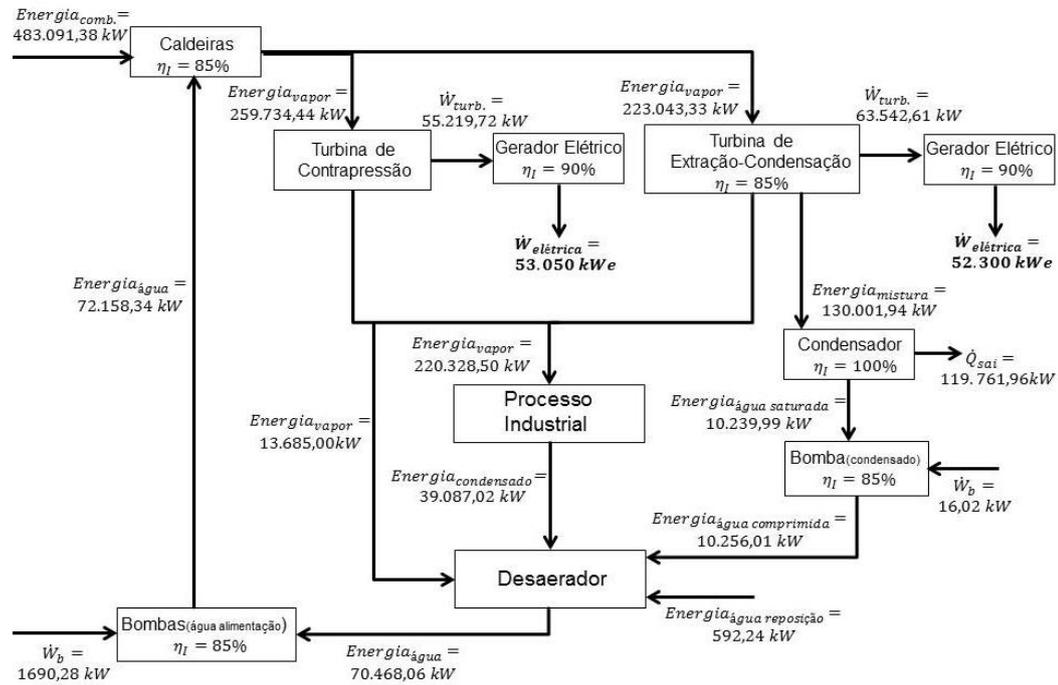
Nessas condições, a eficiência global do ciclo resultou em 28,41%, representando o aproveitamento líquido da energia do combustível.

A potência elétrica gerada, considerando uma eficiência do gerador de 90%, é de 105,35 MWe. Para as condições apresentadas, referentes à última safra, o consumo interno de potência elétrica foi de 12,35 MWe ou 108.186 MWh de energia elétrica, e, portanto, um excedente de 93 MWe (814.680 MWh) passível de ser comercializado.

A eficiência global do sistema pela Segunda Lei da Termodinâmica relaciona a soma de potência elétrica produzida pelo sistema com a exergia produzida pelo processo, e a exergia do combustível. Para a configuração atual, a eficácia global do sistema pela Segunda Lei corresponde a 27,95%.

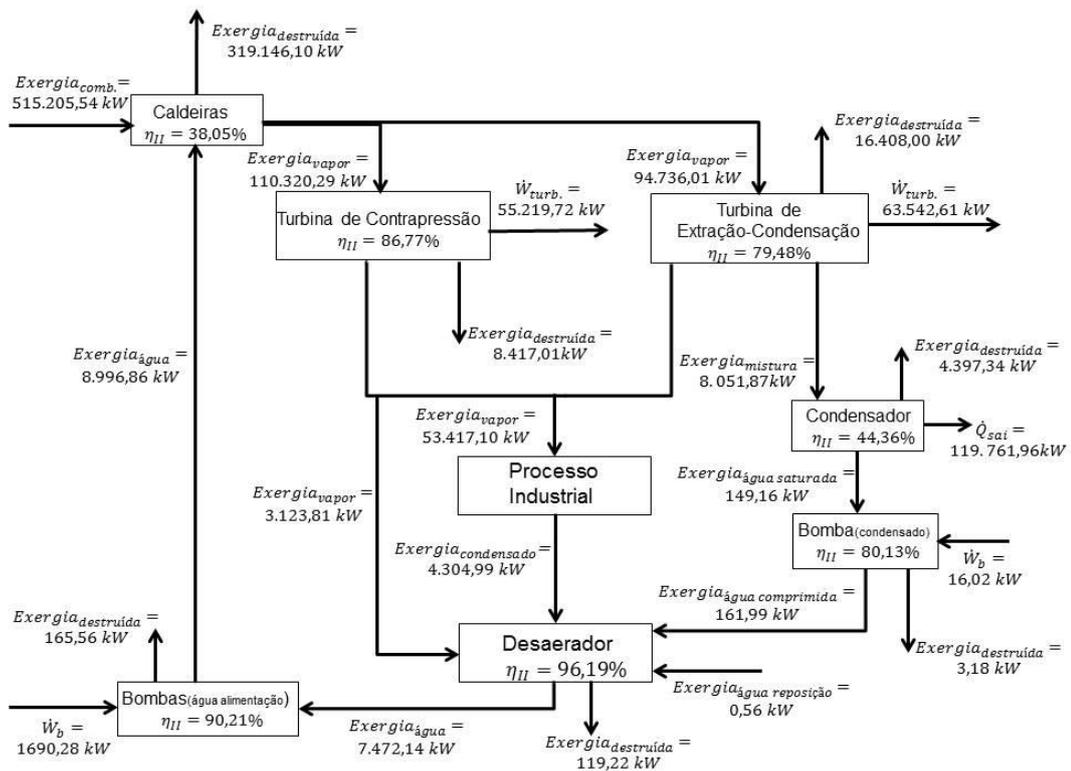
Nas Figuras 21 e 22 são apresentados os fluxogramas de energia e exergia, respectivamente, referentes ao sistema de cogeração no cenário proposto, permitindo uma visão mais clara das perdas no ciclo de potência, devido às irreversibilidades presentes no sistema, bem como o real aproveitamento de toda a energia química contida no bagaço e palhiço a serem queimados de maneira conjunta, convertida em energia térmica requerida pelo processo industrial da usina e potência elétrica gerada nos geradores elétricos da unidade.

Figura 21 – Fluxograma de energia do sistema de cogeração no cenário proposto.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 – Fluxograma de exergia do sistema de cogeração no cenário proposto.



Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONCLUSÕES

Tendo em vista o crítico cenário energético brasileiro atual, a busca de novas fontes para geração de energia elétrica, ou de ganhos de eficiência naquelas já existentes, têm sido objeto de estudo. Neste contexto, o palhiço da cana-de-açúcar, uma biomassa com potencial energético elevado, e até então perdido dentro da cadeia produtiva global de uma unidade sucroenergética, passou a ser investigado como insumo em sistemas de cogeração de energia neste setor. Assim, neste trabalho foi realizado um estudo fundamentado na análise termodinâmica visando o uso adicional do palhiço ao bagaço nas caldeiras de uma usina sucroenergética em operação, objetivando o incremento da cogeração de energia e dos excedentes de eletricidade.

Foi avaliada a planta de cogeração operando na safra de 2016/2017 com a queima exclusiva do bagaço nas caldeiras operando em 58% da sua capacidade nominal de produção de vapor. Toda a produção de vapor foi destinada a atender a demanda do processo industrial, utilizando nesse contexto, apenas a turbina de contrapressão da unidade. A outra vertente analisada buscou utilizar o palhiço disponível na safra em conjunto com o bagaço, mantendo a demanda de vapor pelo processo, bem como o consumo interno de eletricidade, verificando a geração de excedentes de potência elétrica. Nesta análise, o sistema de cogeração operou com as duas turbinas a vapor, além das caldeiras estarem operando em sua capacidade nominal.

Os dados indicam que ao empregar o palhiço para alimentação das caldeiras, juntamente com o bagaço, ocorre uma elevação na disponibilidade de produção de potência e, como consequência, o aumento da eficiência exergética das caldeiras. Independente da configuração, as eficiências das caldeiras pela Primeira Lei (85%), são bem maiores que aquelas obtidas pela Segunda Lei, diferença esta explicada pela própria definição, pois enquanto que a primeira lei expressa apenas a relação entre a energia útil absorvida pelo vapor e a energia do combustível pelo seu poder calorífico, a segunda estabelece uma relação entre o trabalho máximo que poderia ser extraído pelo vapor produzido pela caldeira e a exergia disponível pelo combustível.

As maiores irreversibilidades nas configurações do sistema de cogeração são evidenciadas nos sistemas de geração de vapor, pelo qual as perdas acontecem desde a liberação de calor pelo combustível no processo de combustão.

A eficiência global do ciclo pela Primeira Lei para a configuração atual resultou em um percentual muito maior (77,51%) do que o obtido na configuração proposta (28,41%), indicando que houve um maior aproveitamento líquido da energia do combustível no sistema

atual. Em contrapartida, há uma maior geração de potência na configuração proposta. Estudos apontam que o comportamento da eficiência global da planta é sensível à variação na vazão de condensado nas turbinas de extração-condensação, com uma relação inversa de proporcionalidade, ou seja, quanto maior a condensação, menor é a eficiência global da planta, já que existe grande perda de energia por transferência de calor para fora da fronteira.

Avaliando a eficiência global do ciclo pela Segunda Lei, a configuração proposta apresentou um melhor aproveitamento do máximo potencial de exergia disponível dos combustíveis, embora ainda seja baixo, o que pode ser evidenciado nas duas configurações devido à grande parcela de exergia destruída nas caldeiras devido ao processo de combustão.

A inserção do palhiço no ciclo de geração a vapor possibilitou um ganho máximo anual de 814,7 GWh de excedentes de energia, representando um incremento de 130% quando comparado com a planta atual.

Assim sendo, a adição do palhiço em queima conjunta com o bagaço, considerando os dados de produtividades da safra 2016/2017 e as características de operação dos equipamentos da usina, revelou ganhos na geração de excedentes de energia elétrica, porém apresentou-se como um sistema de baixa eficiência quando comparado às condições do sistema existente. Todavia, objetivando a geração de excedentes de energia, o uso do palhiço no sistema pode ser considerado interessante do ponto de vista termodinâmico, embora não tenham sido avaliados os aspectos da termoeconomia, referentes ao uso da exergia no sistema de cogeração e aos custos do recolhimento e transporte do palhiço até a usina.

REFERÊNCIAS

- ALCOOBRÁS. Reportagem de Capa: Possibilidade de abertura do mercado de carbono estimula investimento em co-geração de energia. **Revista Alcoobrás**; São Paulo; ano VII – n° 80 – jul./ago., 2003.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Banco de Informações de Geração**: BIG. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 09 jun. 2017.
- BRAY, Sílvio Carlos; FERREIRA, Enéas Rente; RUAS, Davi Guilherme Gaspar. **As políticas da agroindústria canavieira e o PROÁLCOOL no Brasil**. Marília: UNESP-Marília-Publicações, 2000. 104 p.
- CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol de cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Cana-de-açúcar**. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v.4 – Safra 2017/18, n.1 – Primeiro levantamento, Brasília, p. 1-57, abril 2017.
- CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. 2001. 174 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- CORRÊA NETO, Vicente; RAMON, Dan. **Análises de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucro-alcooleiro**. Brasília, DF: SETAP – Sustainable Energy Technology Assistance Program, 2002. 116 p.
- DEFILIPPI FILHO, Luiz Cunali. **Estudo de viabilidade do uso do palhico para geração de energia na entressafra de uma usina sucroenergética**. 2013. 133 p. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2013.
- ELEKTRO - Eletricidade e Serviços (Org.). **Manuais Elektro de Eficiência Energética**. Brasília: Eletrobrás, 2008.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balço Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- FERREIRA, Elzimar Tadeu de Freitas. **Análise de Sistemas de Cogeração com Gaseificação de Licor Negro no Setor de Papel e Celulose**. 2008. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.
- FRANCO, Fabiana Nicoleti. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhico de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) a granel**. 2003.

113 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

FURLANI NETO, V. L.; RIPOLI, T.C.; VILLA NOVA, N. A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhicho remanescente de colheita mecânica. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**. Piracicaba, v. 15, n. 4, p. 24-27, 1997.

HASSUANI, Suleiman José; LEAL, Manoel Regis Lima Verde; MACEDO, Isaías de Carvalho. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. PNUD-CTC. 1. ed. Piracicaba, 2005. 217p.

LACERDA, Kaito Arnoni. **Remodelagem de uma usina sucroalcooleira para incremento da cogeração de energia com aproveitamento do palhicho**. 2015. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

LORA, Electro Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antonio Rosa do. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação**. Rio de Janeiro: Interciência, Vol. 1, 2004.

MAEDA, Fábio. **Influências do protocolo agroambiental do setor sucroalcooleiro na produção de açúcar, álcool e energia: estudo de caso em uma usina no interior do Estado de São Paulo**. 2012. 78 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

MATO GROSSO DO SUL (Estado). Lei n. 3.357, de 9 de janeiro de 2007. Estabelece normas para a redução gradual da queima da palha da cana-de-açúcar, sem prejuízo da atividade agroindustrial canavieira e dá outras providências. **Diário Oficial [do] Estado de Mato Grosso do Sul**, Campo Grande, MS, 09 maio 2007. Disponível em: <[http://aacpdappls.net.ms.gov.br/appls/legislacao/secoge/govato.nsf/\\$\\$Search?OpenForm&Seq=1](http://aacpdappls.net.ms.gov.br/appls/legislacao/secoge/govato.nsf/$$Search?OpenForm&Seq=1)>. Acesso em: 15 jun. 2017.

MELLO, Arthur Miola de. **Desempenho de uma enfardadora prismática no recolhimento de palhicho**. 2009. 89 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2009.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil); EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília: MME/EPE, 2015.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NEVES, Marcos Fava; CONEJERO, Marco Antonio. **Estratégias para a cana no Brasil: Um negócio classe mundial**. São Paulo: Atlas, 2010.

NOVACANA (Brasil). **A Produção de cana-de-açúcar no Brasil (e no mundo)**. 2017. Disponível em: <<https://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/>>. Acesso em: 31 maio 2017.

- ORLANDO FILHO, J.; ROSSETO, R.; MURAOKA, T.; ZOTELLI, H. B. Efeitos do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**. Piracicaba, v.16, n.6, p.30-33, 1998.
- PACHECO, Juliana Dorneles; CORREIA, Mateus Azevedo Chaves. **Análise termodinâmica de sistemas de cogeração na indústria de celulose**: comparativo entre queima e gaseificação do licor negro. 2015. 120 p. TCC (Graduação em Engenharia de Energia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.
- REDÍGOLO, Silvio César Rosa. **Recuperação da palha da cana-de-açúcar para a produção de energia elétrica e etanol celulósico**. 2014. 177 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.
- RIPOLI, T. C. C.; MOLINA JR, W. F.; NOGUEIRA, M. C. S.; MATOS DE, J. R. Equivalente energético do palhicho da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola/ESALQ, 1990. p. 249 - 262.
- RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T. C. Caracterização dos principais constituintes da biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 4., São Paulo, 1995. **Resumos...** Piracicaba: EDUSP, 1995. v. 1, p. 463.
- RIPOLI, Marco Lorenzo Cunali. **Mapeamento do palhicho enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético**. 2002. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- _____. **Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para fins energéticos**. 2004. 213 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu, 2004.
- RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T. C. C.; GAMERO, C. A. Colheita integral: retrocesso ou barateamento do sistema? **Idea News**, Ribeirão Preto, v. 4, n. 28, p. 66-67, 2003.
- ROCHA, Glauber. **Análise Termodinâmica, Termoeconômica e Econômica de uma Usina Sucroalcooleira com Processo de Extração por Difusão**. 2010. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.
- SÃO PAULO (Estado). Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**, São Paulo, SP, 20 set. 2002. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/norma/?id=217>>. Acesso em: 15 jun. 2017.
- SARTORI, Maria Márcia Pereira. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar**. 2001. 108 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

SANTOS, Fernando Butierres dos; NOVO, Luciana Morgani Alves. **Fundamentos Teóricos Relacionados à Cogeração e o exemplo da Central de Cogeração Infoglobo**. 2008. 176 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, Lizandra Duarte da. **Bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar: Uma análise para o Estado de Mato Grosso do Sul**. 2016. 50 p. TCC (Graduação em Ciências Econômicas) - Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2016.

SOUZA, Zigomar Menezes de; PRADO, Renato de Mello; PAIXÃO, Antônio Claret Strini; CESARIN, Luiz Gilberto. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p.271-278, mar. 2005.

TORREZAN, Hamilton Fernando. **Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética**. 2003. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Linha do tempo da cana-de-açúcar no Brasil**. 2017a. Disponível em: <
<http://www.unica.com.br/linhadotempo/index.html>> Acesso em: 31 maio 2017.

_____. **Bioeletricidade**. 2017b. Disponível em < <http://www.unica.com.br/faq/>>. Acesso em: 09 jun. 2017.

_____. **Bioeletricidade em Números – Abril de 2017**. 2017c Disponível em: <
<http://www.unica.com.br/documentos/documentos/bioeletricidade/pag=0>>. Acesso em: 09 jun. 2017.

ANEXO A – DETERMINAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EXCEDENTE

A energia elétrica gerada nos geradores elétricos do ciclo a vapor é função do trabalho de eixo nas turbinas de contrapressão e extração-condensação descontado o trabalho fornecido ao fluido pelas bombas de água de alimentação e de condensado dos sistemas de cogeração. Um dos caminhos para variar a energia nos sistemas é o trabalho, determinado pelas entalpias nos estados de entrada e saída dos volumes de controle estabelecidos para as turbinas e bombas.

A) Cenário Atual

- **Trabalho de eixo na turbina de contrapressão:**

$$\dot{W}_{turbina\ contrapress\tilde{a}o} = \dot{m}_1 \times (h_1 - h_7)$$

$$\dot{W}_{turbina\ contrapress\tilde{a}o} = 80,71034\ kg/s \times (3.476 - 2.737)kJ/kg = \mathbf{59.644,94\ kW}$$

$$\dot{W}_{bombas\tilde{a}gua\ alimenta\tilde{c}\tilde{a}o} = 2 \times \dot{m}_{10} \times (h_{11} - h_{10})$$

$$\dot{W}_{bombas\tilde{a}gua\ alimenta\tilde{c}\tilde{a}o} = 2 \times 40,355\ kg/s \times (519,54 - 507,37)kJ/kg = \mathbf{982,84\ kW}$$

$$\dot{W}_{eixo} = \dot{W}_{turbina\ contrapress\tilde{a}o} - \dot{W}_{bombas\tilde{a}gua\ alimenta\tilde{c}\tilde{a}o} = \mathbf{58.662,10\ kW}$$

- **Energia elétrica passível de ser comercializada:**

O período de safra contabilizado pela unidade industrial foi de 365 dias (8760 horas). Além disso, foi considerado para os cálculos uma eficiência térmica de 90% para o gerador elétrico. Sendo assim, a energia elétrica gerada equivale a:

$$\dot{W}_{el\tilde{e}trica\ gerada} = \dot{W}_{eixo} \times 0,9 = \mathbf{52.796,43\ kW_e}$$

$$Energia\ el\tilde{e}trica\ gerada = 52.796,43\ kW_e \times 8.760\ h = \mathbf{462.496,73\ MWh}$$

$$Energia\ el\tilde{e}trica\ excedente = Energia\ el\tilde{e}trica\ gerada - Energia\ el\tilde{e}trica\ consumida$$

$$Energia\ el\tilde{e}trica\ excedente = 462.496,73\ MWh - 108.186\ MWh$$

$$= \mathbf{354.310,73\ MWh\ ou\ 354,3\ GWh}$$

B) Cenário Proposto

- Trabalho de eixo nas turbinas de contrapressão e extração-condensação:

$$\dot{W}_{\text{turbina contrapressão}} = \dot{m}_1 \times (h_1 - h_7)$$

$$\dot{W}_{\text{turbina contrapressão}} = 74,722 \text{ kg/s} \times (3.476 - 2.737) \text{ kJ/kg} = 55.219,72 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{\text{turbina extração-condensação}} = (\dot{m}_2 \times h_2) - (\dot{m}_6 \times h_6) - (\dot{m}_3 \times h_3)$$

$$\dot{W}_{\text{turbina extração-condensação}} = (64,167 \times 3.476) - (10,778 \times 2.737) - (53,389 \times 2.435) = 63.542,61 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{\text{bombas água alimentação}} = 2 \times \dot{m}_{10} \times (h_{11} - h_{10})$$

$$\dot{W}_{\text{bombas água alimentação}} = 2 \times 69,444 \text{ kg/s} \times (519,54 - 507,37) \text{ kJ/kg} = 1.690,28 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{\text{bomba condensado}} = \dot{m}_4 \times (h_5 - h_4)$$

$$\dot{W}_{\text{bomba condensado}} = 53,389 \text{ kg/s} \times (192,1 - 191,8) \text{ kJ/kg} = 16,02 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{\text{eixo}} = \dot{W}_{\text{turbina contrapressão}} + \dot{W}_{\text{turbina extração-condensação}} - \dot{W}_{\text{bombas água alimentação}} - \dot{W}_{\text{bomba condensado}}$$

$$\dot{W}_{\text{eixo}} = 55.219,72 + 63.542,61 - 1.690,28 - 16,02 = 117.056,03 \text{ kW}$$

- Energia elétrica passível de ser comercializada:

O período de safra contabilizado pela unidade industrial foi de 365 dias (8760 horas). Além disso, foi considerado para os cálculos uma eficiência térmica de 90% para os geradores elétricos. Sendo assim, a energia elétrica gerada equivale a:

$$\dot{W}_{\text{elétrica gerada}} = \dot{W}_{\text{eixo}} \times 0,9 = 105.350,43 \text{ kW}$$

$$\text{Energia elétrica gerada} = 105.350,43 \text{ kW} \times 8.760 \text{ h} = 922.869,74 \text{ MWh}$$

$$\text{Energia elétrica excedente} = \text{Energia elétrica gerada} - \text{Energia elétrica consumida}$$

$$\text{Energia elétrica excedente} = 922.869,74 \text{ MWh} - 108.186 \text{ MWh}$$

$$= 814.683,74 \text{ MWh ou } 814,7 \text{ GWh}$$

OBSERVAÇÃO: Os valores de vazões mássicas são números que acarretam inúmeras casas decimais devido às transformações de unidades envolvidas. Todos os cálculos foram

realizados no *software* Excel, e, embora, nos cálculos expostos tenha sido apresentados valores com apenas três casas decimais, os resultados finais podem apresentar uma pequena variação decimal.