

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA DA BIOMASSA

LUIS CLAUDIO DE AVILA TRANI FERNANDES

**VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
NA ENTRESSAFRA DE UMA USINA DE AÇUCAR E ÁLCOOL**

Rio Largo
Alagoas - Brasil
2018

LUIS CLAUDIO DE AVILA TRANI FERNANDES

**VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
NA ENTRESSAFRA DE UMA USINA DE AÇUCAR E ÁLCOOL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Profissional em Energia da Biomassa, Centro de Ciências Agrárias Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Energia da Biomassa.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Araujo Ferreira Junior

Rio Largo
Alagoas - Brasil
2018

Catálogo na fonte Universidade
Federal de Alagoas
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias
Bibliotecário: Erisson Rodrigues de Santana

F363v Fernandes, Luis Claudio de Avila Trani

Viabilidade técnico-econômica de geração de energia elétrica na
entressafra de uma usina de açúcar e álcool. Rio Largo - AL – 2018.
75 f.; il; 33 cm

Dissertação (Mestrado profissional em energia da biomassa) -
Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio
Largo, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Araujo Ferreira Junior

1. baçaco. 2. Energia. 3. Cana-de-acucar. I. Título.

LUIS CLAUDIO DE AVILA TRANI FERNANDES

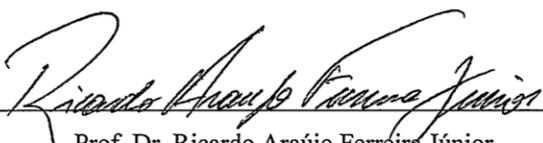
TERMO DE APROVAÇÃO

**“Viabilidade técnico-econômica de geração de energia elétrica na entre
safra de uma usina de açúcar e álcool”**

Esta dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre Profissional em Energia da Biomassa, outorgado pela Universidade Federal de Alagoas.

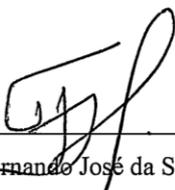
A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Aprovado em 25/10/2018.



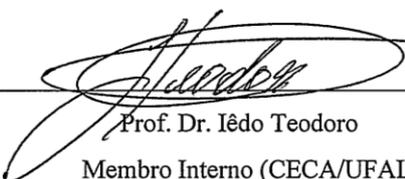
Prof. Dr. Ricardo Araújo Ferreira Júnior

Orientador (CECA/UFAL)



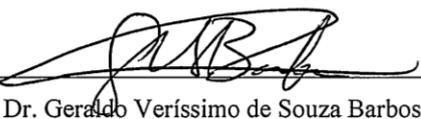
Prof. Dr. Fernando José da Silva

Membro Externo (IFAL/CAMPUS MACEIÓ)



Prof. Dr. Iêdo Teodoro

Membro Interno (CECA/UFAL)



Prof. Dr. Geraldo Veríssimo de Souza Barbosa

Membro Interno (CECA/UFAL)

Rio Largo – AL

2018

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Branca que deu força para suportar as várias horas de leituras, estudo e nervosismo para poder finalizar mais essa etapa da vida acadêmica.

A Meus filhos Mário Luis e Mateus, esperando que com este exemplo entendam que podemos estudar em qualquer época da vida.

A meus pais e avós que sempre me deram mais crédito do que realmente mereço.

Ao professor Ricardo Araújo Ferreira Junior que acreditou no tema proposto.

Aos professores do IFAL, Campus Maceió, do curso de eletrotécnica, que assumiram parte de minhas disciplinas para que pudesse me dedicar a este desafio.

Ao engenheiro Alexandre, Gerente industrial da Usina Leão Irmãos, que abriu as portas dos dados solicitados e seus conhecimentos que ajudaram muito no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores da UFAL do curso de pós-graduação da energia da biomassa.

“Se quiser derrubar uma árvore na metade do tempo,
passe o dobro do tempo amolando o machado”

Provérbio Chinês

“O maior perigo em tempos turbulentos não é a
turbulência em si, mas agir com a lógica do passado.”

Peter Drucker

“Ficava a fábrica bem perto da casa-grande. Um enorme edifício de telhado baixo, com quatro biqueiras e um bueir branco, a boca cortada em diagonal. Não sei porque os meninos gostam tanto das máquinas. Minha atenção inteira foi para o mecanismo do engenho. Não reparei em mais nada. Voltei-me inteiro para a máquina, para as duas bolas giratórias do regulador. Depois comecei a ver os picadeiros atulhados de feixes de cana, o pessoal da casa das caldeiras. Tio Juca começou a me mostrar como se fazia o açúcar. Mestre Cândido com uma cuia de água de cal que ia deitando nas tachas e as achas a ferver, o cocho com o caldo frio e uma fumaça cheirosa a entrar pela boca da gente.”

”Menino de engenho”. José Lins do Rego

VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA ENTRESSAFRA DE UMA USINA DE AÇUCAR E ÁLCOOL

RESUMO

O estado de Alagoas já foi um dos maiores produtores de açúcar do Brasil e ao longo dos anos vem perdendo espaço para outras áreas agrícolas como os estados Minas Gerais e Goiás. O número de usinas em atividades no estado vem diminuindo no decorrer dos anos, passando de 24 unidades em 2008 para 17 em 2017. Faz-se necessário buscar alternativas locais que permitam diagnosticar e mudar essa situação. Este estudo visa analisar uma usina que não vende energia elétrica para o mercado e buscar meios que possibilitem a exportação de uma solução, seja para o mercado livre ou para uso no seu sistema irrigante. Para isso, foi feito levantamento de informações tanto da área agrícola quanto da área industrial, a fim de traçar um diagnóstico mais amplo da usina avaliada. Como o preço é um fator decisivo na tomada de decisão de investimento para venda de energia excedente, foi realizado um levantamento da estrutura de regulação de preços os fatores que nele impactam. Conclui-se que é possível gerar energia elétrica para venda, desde que essa geração possa ser feita na entressafra, utilizando-se a sobra de bagaço gerado na safra e com a compra e instalação de uma turbina de condensação exclusivamente para gerar energia elétrica, aproveitando toda a infraestrutura de tubulações e caldeira existente, bem como dos geradores já instalados. Para que esta situação possa ser implementada é necessário um forte esforço de recuperação da produção de cana-de-açúcar para valores acima de 1 milhão de toneladas, valores estes já alcançados em anos anteriores. Essa medida não só viabilizará a geração de energia para venda, como possibilitará a venda de açúcar e etanol em volumes maiores e portando aumentando a receita das unidades de produção.

Palavras-chave: bagaço, energia, cana-de-açúcar

TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY OF THE GENERATION OF ELECTRIC ENERGY IN THE OFF SEASON OF A USES OF SUGAR AND ALCOHOL

ABSTRACT

The state of Alagoas was once one of the largest sugar producers in Brazil and over the years has been losing space to other agricultural areas such as the states of Minas Gerais and Goiás. The number of mills in activities in the state has been decreasing over the years, from 24 units in 2008 to 17 in 2017. It is necessary to look for local alternatives to diagnose and change this situation. This study aims at analyzing a plant that does not sell electricity to the market and find ways to export a solution, either to the free market or to use in its irrigating system. For this, a survey was made of both the agricultural area and the industrial area, in order to draw a broader diagnosis of the evaluated plant. As price is a decisive factor in the investment decision to sell surplus energy, a survey of the structure of price regulation was carried out on the factors that affect it. It is concluded that it is possible to generate electricity for sale, provided that this generation can be made in the off season, using the bagasse generated in the harvest and the purchase and installation of a condensation turbine exclusively to generate electric energy, taking advantage of the existing pipeline and boiler infrastructure, as well as the generators already installed. In order for this situation to be implemented, a strong effort is needed to recover sugarcane production to values above 1 million tons, values already reached in previous years. This measure will not only enable the generation of energy for sale, but will also enable the sale of sugar and ethanol in larger volumes and increasing the revenue of the production units.

Keywords: bagasse, energy, sugarcane

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção de cana no Brasil ano-safra 2006-2007 a 2017-2018.....	18
Figura 2. Área canavieira do estado de Alagoas	20
Figura 3. Produção de cana em Alagoas safras 2006/07 a 2017/18.	21
Figura 4. Preço médio da energia Nordeste – Preço de Liquidação das Diferenças.	29
Figura 5. Representação de um conjunto ou "tandem" de moagem.	32
Figura 6. Esquema de uma turbina de contrapressão.	34
Figura 7. Consumo específico de vapor das turbinas de condensação em função da pressão e temperatura	35
Figura 8. Esquema de uma turbina a condensação.	35
Figura 9. Consumo específico de vapor das turbinas de condensação em função da pressão .	36
Figura 10. Esquema de uma turbina com extração.....	37
Figura 11. Imagens usina Utinga Leão	38
Figura 12. Produção de cana-de-açúcar na usina Utinga Leão.....	40
Figura 13. Tempo de geração de energia na entressafra em função da moagem.	56
Figura 14. – Valor Líquido Presente (VLP) para várias safras e preços de energia no Preço da Liquidação das Diferenças (PLD).	58
Figura 15. – Taxa Interna de Retorno (TIR) para várias safras e preços de energia no Preço da Liquidação das Diferenças (PLD).	58
Figura 16. Payback simples para várias safras e preços de energia segundo o Preço da Liquidação das Diferenças (PLD).	59
Figura 17. Payback descontado para várias safras e preços de energia segundo o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD).	60
Figura 18. Índice de Lucratividade para várias safras e preços de energia no PLD – Preço de Liquidação das Diferenças.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção de energia (MWh) para venda em Alagoas - Anos de 2010 a 2014.....	22
Tabela 2. Produção de cana das 3 maiores geradoras de energia elétrica do estado de Alagoas.	22
Tabela 3. Capacidade instalada de geração elétrica do Brasil: Situação em 2017.	23
Tabela 4. Poder calorífico inferior do bagaço em função da umidade	28
Tabela 5. Variação média do bagaço.....	42
Tabela 6. Dados técnicos das caldeiras	43
Tabela 7. Consumo de vapor nas turbinas nos acionamentos mecânicos.	45
Tabela 8. Consumo de vapor nas turbinas nos geradores de energia elétrica.	46
Tabela 9. Estimativa de custo do empreendimento.	49
Tabela 10. Tempos de moagem para safras simuladas da usina.	53
Tabela 11. Bagaço produzido para safras simuladas da usina.....	53
Tabela 12. Produção, consumo e perdas de bagaço consideradas.....	55
Tabela 13. Tempo de geração na entressafra.....	56
Tabela 14. Valor de venda PLD - Preço Liquidação das Diferenças para o Nordeste.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Valores aceitáveis da análise econômica.....	62
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
BEAL	Balanço Energético de Alagoas
b_h	Bagaço por hora
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEC	Custo Econômico
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CMO	Custo marginal de Operação
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
CV	Cavalo-vapor
CVh	Cavalo vapor hora
Ch	Consumo horário
COP	Custo de Operação
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IAA	Instituto do açúcar e do Alcool
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICB	Índice de Custo Benefício
LER	Leilão de Energia Reserva
LFA	Leilão de Fontes Alternativas
MCP	Mercado a Curto Prazo
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PBS	Payback Simples
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PNE	Plano Nacional de Energia
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
SINDAÇUCAR	Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCH	Tonelada de Cana por Hectare

TCh	Tonelada de Cana por hora
TVh	Tonelada de vapor por hora
ROI	Retorno Sobre Investimento
TIR	Taxa Interna de Retorno
UNICA	União da Industria da Cana-de-açúcar
UEP	Universidade Estadual de Pernambuco
VAL	Valor Atual Líquido
Ve	Consumo Especifico de Vapor
Vh	Consumo Horário de Vapor
VLP	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Setor sucroenergético no Brasil	17
2.2 Setor sucroenergético no Estado de Alagoas	18
2.2.1 Breve histórico do setor.....	18
2.2.2 Situação do setor	19
2.2.3 O cultivo da cana-de-açúcar no estado de Alagoas.....	19
2.2.4 Unidades geradoras de energia elétrica.....	21
2.3 Setor elétrico no Brasil.....	22
2.3.1 Comercialização de energia	24
2.3.2 Controle operacional e validação do preço da energia elétrica.....	25
2.3.3 Influência dos tipos de geração no preço dos Leilões de energia	26
2.4 A Energia da biomassa no setor sucroenergético	26
2.5 Problemas enfrentados pela geração de energia da biomassa.....	29
2.6 Sistema de cogeração.....	31
2.7 Sistemas necessários para produção de vapor e energia elétrica	31
2.7.1 Campo	31
2.7.2 Moendas	32
2.7.3 Caldeiras.....	33
2.7.4 Turbinas.....	33
2.7.5 Gerador de energia	37
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1 Variáveis do sistema de produção.....	39
3.2 Dados agrícolas e industriais	39
3.2.1 Total de cana-de-açúcar processada por safra.....	39
3.2.2 Capacidade de moagem.....	40
3.2.3 Tempo de moagem.....	41
3.2.4 Bagaço gerado na safra	42

3.2.5	Utilização do bagaço da cana para paradas programadas e eventuais	42
3.2.6	Consumo de vapor e bagaço para o estudo	42
3.2.7	Consumo de vapor por hora para turbinas.	44
3.2.8	Consumo de bagaço por hora para geradores.....	45
3.2.9	Bagaço para produção de torta de filtros.....	46
3.2.10	Bagaço entressafra.....	46
3.2.11	Sistema elétrico da usina	46
3.2.12	Carga necessária a manter uma caldeira em operação na entressafra	47
3.3	Levantamento de custo de equipamentos	48
3.4	Análise do preço de energia.....	49
3.5	Tempo total de produção de energia na entressafra.....	49
3.6	Análise da viabilidade econômica	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Tempos de moagem em função das safras de cana-de-açúcar da usina	53
4.2	Bagaço gerado na safra	53
4.3	Balanço de vapor e bagaço para uso na safra	54
4.4	Bagaço para uso na entressafra	54
4.5	Geração de energia elétrica para venda na entressafra	55
4.6	Sobra de bagaço em função da moagem estimada.....	56
4.7	Preço da energia.....	56
4.8	Análises econômicas em função dos preços da energia.....	57
5.	CONCLUSÕES	63
6.	LITERATURA CITADA	64

1. INTRODUÇÃO

Até o ano de 2000, o estado de Alagoas foi o segundo maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil e ficava atrás apenas de São Paulo e perdeu o posto, sucessivamente, para os estados do Paraná, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul. Na safra de 2010/2011, Alagoas chegou a processar 28,9 milhões de toneladas de cana e vem diminuindo sua produção chegando a safra 2017/2018 com a moagem de 13,3 milhões de toneladas, uma redução de aproximadamente 54 % (VIDAL, 2018).

No caso de Alagoas a crise se agravou não apenas em decorrência dos problemas financeiros pelas quais o setor sucroenergético em todo Brasil, os preços no mercado do açúcar e do etanol contribuíram, mas principalmente, por conta da estiagem, este cenário ficou mais agravado.

O baixo desempenho de produção da cana-de-açúcar nas usinas traz como consequência uma menor produção de açúcar e álcool e dos resíduos industriais, como exemplo o bagaço, que é uma das fontes de biomassa utilizadas para a cogeração de calor e eletricidade, através da sua combustão nas fornalhas das caldeiras.

O aproveitamento do bagaço contribui como de fonte de renda alternativa para as usinas ou, no mínimo, as torna autossuficientes na geração de energia na entressafra que não possuem estrutura para venda de energia elétrica e a procura pela possibilidade de aproveitar esse possível excedente, que é consequência do bom rendimento da safra e da eficiência das usinas no uso do vapor em suas turbinas e principalmente o sistema de geração de energia elétrica para a força motriz autossuficiente.

Ressalta-se que as usinas de açúcar têm por característica serem autônomas do sistema elétrico das concessionárias, utilizando-se destas apenas na entressafra e nas partidas das caldeiras durante a safra, quando as caldeiras são desligadas para reparos necessários a limpeza do sistema de processamento.

Para que qualquer melhoria seja implementada, a elaboração de estudos preliminares deve ser realizada como ferramenta de tomada de decisão de qualquer investimento. Projeto conceitual e projeto básico possibilitam aprimoramento das ideias e conseqüentemente dos custos envolvidos, para serem compatíveis com um prazo de retorno do investimento adequado, e dessa forma, serem seguros ao investidor, com a diminuição do risco de implantação de qualquer novo empreendimento.

Este estudo baseou-se no caso da Usina S/A Leão Irmãos, situada no município de Rio Largo, Alagoas. Esta usina possui geração interna de energia elétrica para uso próprio na Indústria, não vendendo energia para o sistema elétrico.

O bagaço excedente durante a safra é quantificado em função da capacidade de moagem, levando-se em consideração as moagens históricas da usina, a fim de definir a capacidade máxima possível de ser alcançada. O preço de energia elétrica para venda no mercado livre também pode ser avaliado, para conhecer a perspectivas de faturamento em função da capacidade de geração da usina. O o custo de aquisição de equipamentos necessários para efetuar a venda dessa energia efetuando uma simulação de cenários de produção e preço de energia com preços de retorno do investimento proposto.

O objetivo geral desse estudo foi avaliar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica com o excedente de bagaço de cana na entressafra da usina.

Como objetivos específicos foram avaliados o balanço de vapor e bagaço da usina e quantificado a sobra de bagaço que pudesse ser usado na entressafra, bem como o dimensionamento da escala mínima de produção de cana-de-açúcar que pudesse retornar num período determinado a uma taxa de mercado para o retorno do empreendimento.

Para a análise econômica foram utilizadas ferramentas financeiras básicas como o Valor Líquido Presente (VLP), a Taxa interna de retorno (TIR), Payback simples, Payback composto e índice de lucratividade (IL).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Setor sucroenergético no Brasil

A competitividade do etanol brasileiro produzido a partir da cana-de-açúcar é reconhecidamente mais eficiente quando comparado as demais matérias-primas utilizadas em outros países e este é um fator determinante para o sucesso do setor. Essa eficiência chamou a atenção de empresas estrangeiras e isso trouxe crescente investimento em aquisições de unidades existentes e construção de novas unidades, a partir do ano de 2003. O aumento da necessidade de substituição de combustíveis fósseis estimulou este movimento e a expansão da demanda externa e interna tem procurado alternativas para fugir da variação do preço do combustível com base no petróleo (GARCIA et al., 2015).

Nos anos de 2005 e 2006, com o estímulo da utilização do etanol como combustível alternativo a gasolina e ao uso da energia elétrica sustentável oferecidos pelo setor sucroenergético, através do uso do bagaço para geração de energia elétrica para venda, com preços atrativos, estimulou a abertura de dezenas de novas unidades produtoras (CRUZ et al., 2003).

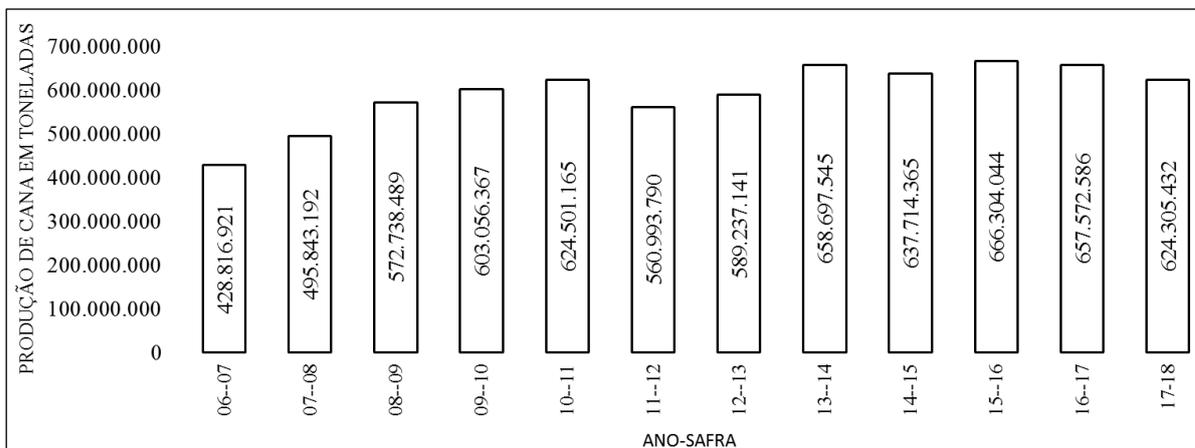
A desregulamentação estatal do setor e a competição com outros países produtores de açúcar e álcool, fez com que os preços caíssem, obrigando o setor a buscar uma reestruturação que possibilitasse a sua sobrevivência. A indústria sucroenergética viu-se obrigada a reduzir os custos de produção tornando-se mais competitiva, com a utilização de novas tecnologias tanto no campo como na indústria (SANTOS, 2012).

Novos centros produtores como Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e Mato Grosso, tem contribuído com expansão da cana-de-açúcar. Como o mercado interno tem uma demanda maior que a oferta, existe a necessidade de aumentar os ritmos de investimentos em novas plantas industriais e na melhoria da eficiência produtiva das plantas existentes mais antigas. No campo, o desenvolvimento tecnológico de novas variedades de cultivares é um caminho a ser seguido. Novos combustíveis como o etanol 2G e 3G estão em fase de desenvolvimento e novas áreas como a química renovável também tem sido estudada como forma de substituir a cadeia do petróleo (GARCIA et al., 2015).

O Brasil alcançou sua maior produção histórica de cana-de-açúcar na safra de 2015-2016 com 666,3 milhões de toneladas. Sucessivamente houve uma redução nas safras 2016-2017 com produção de 657,5 milhões de toneladas com 1,31% a menos que a safra anterior, e na safra 2017-2018 com uma produção de 624,3 milhões de toneladas, com perda de 5,06% em

relação a 2016-2017 (Figura 1). Neste acumulado de 3 anos as perdas acumuladas foram de 6,3% (DCAA, 2018).

Figura 1. Produção de cana no Brasil ano-safra 2006-2007 a 2017-2018.



Fonte: DCAA/SPAE/MAPA (2018)

A área de cana-de-açúcar a ser colhida no Brasil destinada à atividade sucroalcooleira, na safra 2018-2019, deverá atingir 8.613,6 mil hectares, representando uma redução de 1,3% em relação ao ocorrido no exercício anterior. No Nordeste a safra se inicia normalmente entre setembro e outubro de cada ano o que praticamente elimina a sazonalidade dos produtos açúcar e álcool. A queda no Centro-Sul deverá ser compensada em parte pela maior produção no Nordeste, devido a melhora da questão climática, com uma produção esperada de 42,29 milhões de toneladas para a safra 2018-2019, enquanto a safra 2017-2018 foi de 41,14 milhões de toneladas (CONAB, 2018).

2.2 Setor sucoenergético no Estado de Alagoas

2.2.1 Breve histórico do setor

A primeira usina de Alagoas moldada para época com tecnologia moderna foi fundada em 1891. Chamada de Brasileiro, foi instalada no município de Atalaia, pelo Barão de Vandermant, dispunha de infraestrutura tecnológica importada da Europa e com um novo perfil de benefício aos trabalhadores, que passaram a ser operários, com moradia bem estruturada, assistência médica extensiva aos familiares, além de legislação trabalhista avançada e aposentadoria. A usina funcionou até 1958. Nesse período surgiram as usinas Sinimbu, fundada em 1893 no município de Jequiá da Praia, e posteriormente, no ano de 1894, a usina Central Leão, no município de Rio Largo e Serra Grande no município de São Jose da Lage, sendo que essa última formada a partir de um antigo engenho banguê e na década de 1930 lançou no

mercado o álcool como combustível, com a marca USGA (iniciais da usina). Foram instaladas bombas em São José da Laje, Maceió e Recife (TENORIO,2009).

Alagoas sempre acompanhou as inovações tecnológicas e já em 1908 a Usina Sinimbu introduziu a análise química do solo e a adubação verde. Em 1925 a Central Leão foi a primeira usina brasileira a ser eletrificada (LOUREIRO, 1970).

Na evolução do complexo canavieiro alagoano, entre a formação do IAA e a década de 1990, distinguem-se três etapas bem caracterizadas, respectivamente, a da consolidação do parque usineiro (1930-1950), a do processo de expansão e modernização (1950-1975) e a de um segundo surto expansivo ligado ao Proálcool (1975-1989) (LIMA, 2001).

Entre os anos 1975 e 1990, o setor alcooleiro alagoano ampliou sua capacidade produtiva por meio de vinte novas destilarias anexas e nove autônomas, multiplicou a produção de álcool em 25 vezes e quase duplicou sua produção de açúcar e, para tudo isto, triplicou sua área plantada com cana-de-açúcar (CARVALHO, 2001).

2.2.2 Situação do setor

Tendo em vista os reflexos provocados pela crise que afetou o setor sucroalcooleiro, durante os anos de 2008 a 2018 resultado da baixa dos preços internacionais do açúcar e do álcool, como também os altos custos de produção, provocados em virtude da seca que afetou a produção, além da baixa capacidade em investimentos para a melhoria dos canaviais e do nível de endividamento das usinas, o estado de Alagoas vem apresentando uma relevante redução no número de usinas em atividade ao longo desses anos. Em 2000, o estado contava com 23 usinas. Na safra de 2016, estavam em operação apenas 16 usinas (SEPLAN-AL, 2017).

Espera-se uma recuperação no plantio de cana-de-açúcar para a safra 2018-2019, considerando a boa precipitação pluvial entre janeiro e setembro de 2017 entre janeiro e março de 2018. (CONAB, 2018).

2.2.3 O cultivo da cana-de-açúcar no estado de Alagoas

Área de cultivo

O estado de Alagoas localiza-se entre os paralelos 8°48'12" e 10°29'12" de latitude Sul e entre os meridianos 35°09'36" e 38°13'54" de longitude à oeste de Greenwich. Possui 339 km na direção leste-oeste e 186 km na direção norte-sul e tem a cultura da cana situada predominantemente no litoral e zona da mata (Figura 2) (SINDAÇUCAR,2018).

Alagoas em 2011 destacava-se no cenário nacional ocupando a quinta posição em extensão territorial (438 mil hectares) com o cultivo de cana-de-açúcar, aproximadamente 16%

da área do estado, que abrange 27.767 km², concentrada na área de tabuleiros costeiros (CONAB, 2011).

Figura 2. Área canavieira do estado de Alagoas



Fonte: Sindaçucar-AL, 2018. Área canavieira.

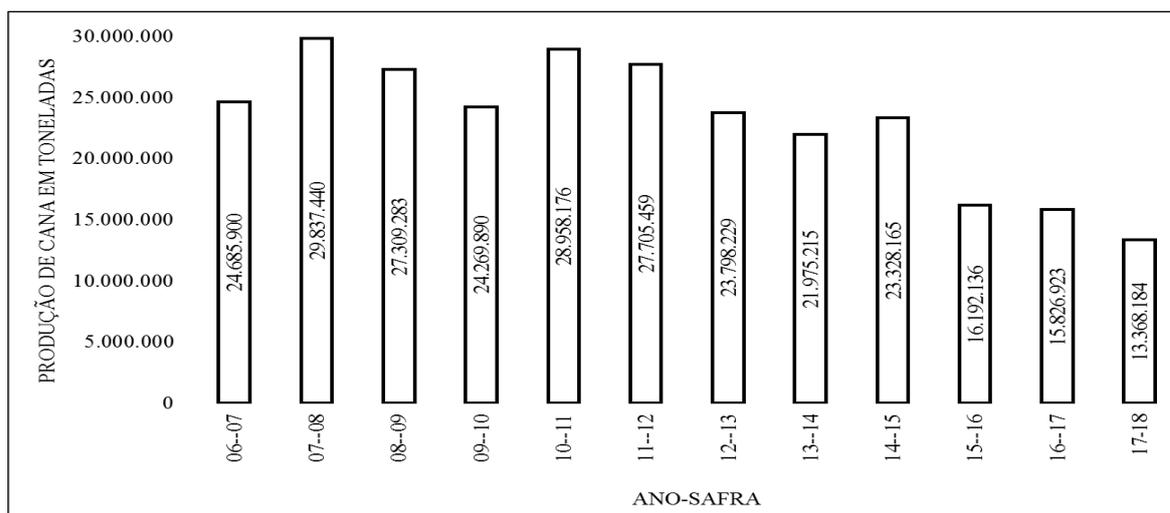
A área colhida na safra de 2017-2018 foi de 303,8 mil hectares, sendo esse um valor de 5,7% menor que a safra 2016-2017 que teve uma safra com 332,2 mil hectares. Com a volta das chuvas no ano de 2018 estima-se uma melhora mais expressiva para a próxima safra 2018-2019 (CONAB, 2018).

Produção de cana-de-açúcar

Nas safras entre 2006 e 2018 em Alagoas (Figura 3), observa-se que houve uma grande quebra de produção de cana, como consequência houve o fechamento de unidades produtivas e queda de arrecadação, proveniente da venda de açúcar, álcool e energia elétrica (SINDAÇUCAR, 2018).

Vários fatores podem ser apontados para este fato, mas a forte estiagem, aliada a problemas financeiros de algumas usinas, contribuíram muito para esta situação. No período entre as safras 2006-2007 a 2017-2018, houve uma diferença de 54%, com 29,8 milhões de toneladas de cana em 2007-2008 e 13,3 milhões de toneladas em 2017-2018, no pior momento. O estado já chegou a produzir 30,2 milhões de toneladas de cana na safra 1986-1987 sendo essa a maior safra histórica (SINDAÇUCAR-AL, 2018).

Figura 3. Produção de cana em Alagoas safras 2006/07 a 2017/18.



Fonte: Sindaçucar-Al (2018). Dados estatísticos

2.2.4 Unidades geradoras de energia elétrica

Embora todas as Usinas no estado possuam cogeração com produção de calor e energia elétrica para atendimento total ou parcial de sua demanda energética, somente algumas se capacitaram para a geração de eletricidade para venda. O Balanço Energético de Alagoas - BEAL (2015) indica que a capacidade de geração total de energia elétrica no Estado em 2014 foi de 211.924 MW, 18,09 % superior ao ano de 2013.

Na Tabela 1 estão indicadas as 11 unidades geradoras para venda desde o ano de 2010 no Estado. Vale salientar que a crise energética no Brasil se iniciou em 2004 e somente 6 anos após é que foi iniciado no estado a venda de energia, pois no início os preços não eram atrativos além do que, houve a necessidade de investimentos para a adaptação necessária em cada unidade, cada uma com sua estratégia de capacidade de geração para atendimento ao mercado.

Segundo Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE (2018) em informações ao mercado, sobre leilões de energia elétrica, destaca que o valor médio da energia no Mercado a Curto Prazo (MCP) entre janeiro e dezembro de 2014 foi de 647,96 R\$/MWh e caiu para 298,07 R\$/MWh em 2015 e em 2016 ficou em 173,56 R\$/MWh. O cenário apresentado, com baixas remunerações, desestimulou o setor sucroenergético a vender energia elétrica para o sistema.

Para entender porque as usinas Caeté, Coruripe e Santo Antônio, maiores geradoras, possuem capacidade de geração para venda, deve-se avaliar a produção de cana-de-açúcar, que possibilita uma maior quantidade de bagaço (Tabela 2).

Tabela 1. Produção de energia (MWh) para venda em Alagoas - Anos de 2010 a 2014.

USINA	MUNICÍPIO	ANOS				
		2010	2011	2012	2013	2014
Caeté	São M. dos Campos	28.355	45.127	41.825	29.075	23.220
Coruripe	Coruripe	45.439	59.020	43.758	40.115	31.096
Santo Antônio	São Luiz do Quitunde	47.521	48.423	50.820	40.064	46.129
Gustavo Paiva (S. Clotilde)	Rio Largo	0	0	3.626	4.612	5.555
Guaxuma	Coruripe	4.081	3.299	2.269	672	24
Marituba	Igreja Nova	14.360	17.113	15.104	13.900	16.213
Serra Grande	São José da Lage	2.168	2.713	2.175	4.159	10.201
Sinimbu	Jequiá da Praia	8.034	7.028	3.568	3.130	4.214
Roçadinho	São M. dos Campos	4.773	8.843	10.987	4.135	0
Benbio (Seresta)	Teotônio Vilela	0	0	166	39.598	51.530
Bioflex/Caeté	São M. dos Campos					23.742
Total		154.731	191.566	174.298	179.460	211.924

Fonte: BEAL 2015. Ano base 2014

A produção média de cana das usinas Caeté, Coruripe e Santo Antônio são respectivamente, 1,8; 3,0 e 2,1 milhões toneladas. Avaliando 6 safras consecutivas (2010-2011 a 2015-2016), a média de produção de cana possibilita uma quantidade de bagaço suficiente para a geração de energia elétrica para venda.

Tabela 2. Produção de cana das 3 maiores geradoras de energia elétrica do estado de Alagoas.

Safra	Caeté [t]	Coruripe [t]	Santo Antônio [t]	Média p/safra [t]
2010-2011	1.796.181	2.906.339	2.162.527	2.288.349
2011-2012	1.682.372	3.071.095	2.038.779	2.264.082
2012-2013	1.677.362	2.870.893	1.925.013	2.157.756
2013-2014	1.900.333	2.927.489	2.159.219	2.329.014
2014-2015	2.081.447	3.069.870	2.477.148	2.542.822
2015-2016	1.891.825	3.032.564	1.937.543	2.287.311
Média	1.838.253	2.979.708	2.116.705	

Fonte: Sindaçucar-AL (2018). Boletim da Safra semanal

2.3 Setor elétrico no Brasil

De acordo com o Ministério de Minas e Energia - MME (2017), o Brasil ainda depende muito da energia elétrica gerada nas hidroelétricas, com 64,5% de contribuição em 2017

(Tabela 3) e desta forma o fornecimento estável de energia está sujeita a variação climática. É bem verdade que os controladores do Sistema elétrico brasileiro possuem ferramentas analíticas que permitem avaliações e simulações do sistema, porém é sempre um risco contar fortemente com uma fonte de energia que não depende totalmente do controle dos operadores do sistema.

O parque gerador é predominantemente hídrico e tende a ter preços baixos sempre que ocorrem períodos de chuvas favoráveis que acumulem água em seus reservatórios e demasiadamente elevados em períodos quando os reservatórios estão baixos, como é o caso atual do Nordeste, por exemplo. Nessas condições são requeridas a complementação com outras fontes, por vezes, mais caras (CASTRO et al., 2010).

Tabela 3. Capacidade instalada de geração elétrica do Brasil: Situação em 2017.

Fonte	Nº Usinas	Capacidade instalada (MW)	Geração distribuída (MW)	Total (MW)	Estrutura %
Hidroelétrica	1.259	96.925	5	96.930	64,50
Gas natural	156	12.965	----	12.965	8,60
Biomassa	504	14.001	----	14.001	9,30
Óleo (fóssil)	2.220	8.877	----	8.877	5,90
Carvão mineral	13	3.389	----	3.389	2,30
Nuclear	2	1.990	----	1.990	1,30
Gás industrial	37	1.925	----	1.925	1,30
Eólica	413	10.124	5	10.129	6,70
Biogás	29	119	----	119	0,10
Solar	44	24	61	84	0,02
Desconhecidas	30	150	12	162	0,10
Total	4.707	150.489	83	150.571	100

Fonte: MME, 2017

A política energética nacional tem negligenciado, ainda, a importância da bioeletricidade gerada a partir da biomassa de cana-de-açúcar, uma fonte de eletricidade produzida na fase de estiagem (abril a novembro, período seco nas nascentes), o que a torna a complementar a hidroelétrica, especialmente num período em que os reservatórios de água encontram-se em situação crítica. Agindo dessa forma, o Brasil caminha na contramão de grande parte dos países

desenvolvidos e em desenvolvimento que tem criado medidas para aumentar a geração de energia a partir da biomassa (NEVES,2014).

Foi realizado um estudo pioneiro no Brasil de planejamento integrado dos recursos energéticos realizado no âmbito do governo onde todas as fontes e formas de energia foram contempladas, destacando-se a hidroeletricidade, o petróleo e seus derivados, o gás natural e os derivados da cana-de-açúcar, além da eficiência energética e da inovação tecnológica. Foram consideradas para expansão da oferta de energia elétrica as seguintes fontes: potencial hidrelétrico, nuclear, carvão mineral, gás natural, biomassa de cana-de-açúcar, eólica, solar, resíduo sólido urbano e outras fontes renováveis (CNI, 2012).

Pela complexidade do sistema elétrico brasileiro interligado faz-se necessário diversos programas computacionais de gerenciamento e proteção do fluxo de potência elétrica que flui nas linhas de transmissão ao longo de todo território brasileiro (Apêndice 1) de forma a garantir o fornecimento de energia elétrica e sua consequente estabilidade e rentabilidade aos geradores de energia e aos consumidores finais em qualquer nível de tensão.

2.3.1 Comercialização de energia

Conforme determinado pela Lei do Novo Modelo do Setor Elétrico, desde a publicação da Lei nº 10.848/2004, e do Decreto nº 5.163/2004, a comercialização de energia elétrica no Brasil é realizada em dois ambientes distintos de contratação: o Ambiente de Comercialização Regulado (ACR) e o Ambiente de Comercialização Livre (ACL). As diferenças entre os montantes de energia contratados e gerados nos dois ambientes de contratação são liquidadas no Mercado Curto Prazo (MCP), ao Preço de Liquidação de Diferenças (PLD), sendo todo sistema gerenciado pela agência reguladora ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (ANEEL, 2014).

No ambiente ACL participam as geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais, e a contratação é feita por livre negociação entre compradores e vendedores e os contratos estabelecidos livremente entre as partes sendo utilizado basicamente por todos os interessados em comprar e vender energia.

No ambiente ACR participam as geradoras, distribuidoras e comercializadoras, e as contratações são efetuadas por meio de leilões de energia promovidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL) e os contratos são regulados pela ANEEL sendo utilizada basicamente entre as empresas distribuidoras de energia e todas as geradoras e comercializadoras.

No modelo MCP participam as geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais, sendo as contratações efetuadas de forma multilateral das liquidações das diferenças contratuais, não havendo um contrato formal, sendo o preço definido no PLD.

Estes leilões ao definirem os preços contratados, define também a participação das fontes de energia utilizadas na geração, o que impacta na matriz elétrica como um todo em termos ambientais, bem como no valor das tarifas pagas pelos consumidores. Os leilões são realizados de diferentes formas, de acordo com o tipo de empreendimento, sendo eles:

Leilão A-1, A-3 e A-5 que são processos licitatórios para a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração existentes realizado com 1 (Curto prazo), 3 (médio prazo) ou 5 (longa maturação) anos, respectivamente, de antecedência do início do suprimento.

Existe ainda o Leilão de projeto estruturante que são de compra de energia proveniente de projetos de geração de caráter estratégico e de interesse público. Estes projetos asseguram a otimização do binômio modicidade tarifária e confiabilidade do sistema elétrico e que garantem o atendimento à demanda nacional de energia elétrica, considerando o planejamento de longo, médio e curto prazos.

Os de Fontes Alternativas (LFA), que tem por objetivo incentivar a diversificação da matriz de energia elétrica, introduzindo fontes renováveis e ampliando a participação de energia eólica e da bioeletricidade.

Os Leilões de Energia de Reserva (LER) tem o objetivo de elevar o patamar de segurança no fornecimento de energia elétrica ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com energia proveniente de usinas especialmente contratadas para este fim. Neste formato podem ser obtidas energia elétrica de hidroelétricas, nuclear, eólica, queima de combustível, biomassa ou outras fontes energéticas ainda em desenvolvimento como energia solar fotovoltaica ou termossolar e energia de novíssimos tipos como a maremotriz ou das ondas.

2.3.2 Controle operacional e validação do preço da energia elétrica

Para avaliação do uso das fontes de energia, são usados programas computacionais que aperfeiçoam a tomada de decisão qual fonte de energia será usada e essas decisões definem os preços no mercado para compra e venda de energia elétrica (Apêndice 2). Essas ferramentas possibilitam o planejamento da operação de longo e médio e curto prazo e determina a cada mês as metas de geração para cada usina do sistema que atendam a demanda e minimizem o valor esperado do custo de operação ao longo do período (ANEEL.2014).

2.3.3 Influência dos tipos de geração no preço dos Leilões de energia

O Brasil tem a vantagem de ter historicamente investido em um parque hidrelétrico que é responsável pela maior parte da produção de eletricidade no país. Com os novos projetos hidrelétricos mais distantes do centro de consumo, e com fortes resistências locais a seu desenvolvimento pleno e à construção de grandes reservatórios para poder manter limpa a sua matriz elétrica, o país terá que ampliar fortemente a participação das demais fontes renováveis com ênfase não apenas nas eólicas (já competitivas com as fontes tradicionais em alguns casos), mas também na energia solar, assim como ampliar o aproveitamento da biomassa e desenvolver outras alternativas ainda em evolução, como a energia das marés (FLÔRES JUNIOR et al., 2016).

A formação de preço da energia elétrica, com preponderância de geração térmica, tem os preços da geração variando na mesma direção dos preços dos insumos energéticos. As centrais térmicas no Brasil são mantidas preferencialmente desligadas e só são acionadas em condições especiais de problemas de geração ou transmissão, ou ainda quando o reservatório das hidroelétricas se encontra com níveis abaixo de suas capacidades (CASTRO et al., 2010).

Embora com menos expressão, observa-se ao longo de toda a expansão do setor elétrico brasileiro, um histórico de utilizações pontuais de diversas formas de biomassa oriunda de diversas fontes tais como: a lenha e os resíduos das indústrias da madeira e da celulose, incluindo a lixívia negra produzida nessa última; o bagaço de cana e outros resíduos agrícolas como as cascas de arroz; e ainda o biogás gerado a partir de rejeitos sólidos rurais e urbanos (FLÔRES JUNIOR et al., 2016).

2.4 A Energia da biomassa no setor sucroenergético

O termo biomassa engloba a matéria vegetal oriunda da fotossíntese e seus derivados, tais como resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos, municipais, entre outros. Ela é uma energia renovável ao longo do tempo (GALBIATI et al., 2010).

O bagaço gerado no processamento da cana é um subproduto inerente ao processo de fabricação de açúcar e álcool, sendo o balanço energético relacionado ao consumo de bagaço para geração de vapor e a produção de eletricidade para força motriz das usinas totalmente relacionado e viável, garantindo assim uma quantidade de bagaço que possa ser utilizado para produção de energia elétrica para venda (SANTOS, 2012).

A não utilização da biomassa residual para fins energéticos implicará sua aplicação para outros fins, como aplicação em lavoura como adubo, fabricação de pellets para queima ou como ração animal, sendo que para este fim o ideal é que seja hidrolisada (MEDEIROS, 2015).

A biomassa voltou a ser a segunda fonte de geração mais importante do Brasil na oferta interna de energia elétrica com registro de 8,8% em 2016, superando os 8,1% da participação do gás natural. A importância do bagaço de cana para a matriz de biomassa para geração de energia elétrica no Brasil, com 79% de contribuição, é expressiva, sem contar o potencial de crescimento com a utilização da palha, que começa a despontar em algumas unidades (MME, 2017).

O bagaço de cana

Para avaliar a capacidade de geração de energia elétrica em uma caldeira que queima bagaço de cana é fator primordial conhecer bem este combustível. O bagaço é o resíduo da cana moída, sendo a matéria fibrosa sólida expulsa da abertura de saída da última moenda do tandem após a extração do caldo (HUGOT, 1977).

Na cana, os altos teores de fibra dificultam a extração do caldo, exigindo um melhor preparo da cana, bem como uma maior embebição. Os baixos teores de fibra diminuem a quantidade de bagaço, ocasionando o desequilíbrio térmico da fábrica. Um teor de fibra muito alto, por exemplo maior que 14%, resulta num consumo excessivo de potência nas moendas, além de prejudicar a extração da sacarose, sendo, portanto, indesejado. A fibra da cana permanece constante ao longo de toda a operação de extração do caldo, saindo do último terno sob a forma de bagaço, cuja composição aproximada é de 50% de umidade, 4% de sólidos dissolvidos e 46% de fibra (LOPES et al., 2011).

Geralmente a fibra da cana é suficiente para que a quantidade de bagaço produzido pelas moendas seja utilizada como combustível nas fornalhas das caldeiras e produza todo vapor necessário ao funcionamento das máquinas e a fabricação de subprodutos. Com a fibra normal entre 12% e 14% e uma usina bem equilibrada e bem concebida, tem-se um excesso de bagaço que pode ser utilizado para outros fins, como bombeamento de água para irrigação, fabricação de subprodutos e fornecimento de energia para rede (HUGOT, 1997)

As tecnologias utilizadas para geração de energia elétrica a partir da biomassa são a combustão direta acoplada a um ciclo de vapor e a gaseificação. A primeira é altamente demandada pela necessidade do setor sucroenergético e o aumento no consumo ajudou o Brasil a dominar as tecnologias de projeto e fabricação, sendo hoje capaz de produzir os componentes a custos internacionalmente competitivos (CORTEZ et al., 2008).

Poder calorífico do bagaço

Inicialmente é necessário definir os 2 tipos de poder calorífico: Poder Calorífico Superior (PCS) em base seca, onde não se leva em consideração o calor associado à condensação da água formada em reação com o hidrogênio contido na biomassa; Poder Calorífico Inferior (PCI) é calculado subtraindo do PCS o calor associado com a condensação do vapor de água formado pela reação do hidrogênio contido na biomassa. Durante a determinação do PCI na base de trabalho, deve-se levar em consideração o teor de umidade presente (SILVA E MORAIS, 2008)

Segundo Hugot (1997), o poder calorífico é a quantidade de calor que a combustão de 1 kg de combustível considerado pode fornecer, e distingue-se de duas formas:

Poder calorífico inferior ou PCI, que supõe, pelo contrário, que a água formada pela combustão, assim como a água fisiológica do combustível permaneça na forma de vapor.

O Poder Calorífico Superior (PCS) estabelece o potencial de calor teoricamente contido no combustível, porém como na prática, não se consegue abaixar a temperatura dos gases de combustão abaixo do ponto de condensação, o PCI fornece um valor realmente possível de ser obtido. No passado, as variedades de cana possuíam pouca fibra, gerando pouco bagaço; as variedades foram então sendo melhoradas para que se obtivesse melhores teores de fibra para a produção de energia (Cortez, 2008).

Para os estudos práticos de combustíveis em caldeiras pode ser considerado como segue na Tabela 4, sendo considerado que: O poder calorífico inferior é obtido pela composição química, aplicando-se a expressão abaixo com os valores de C, H₂, O₂ e H₂O (PERES, 1982).

$$PCI = 8.100xC + 28.700 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) - 600xH_2O$$

Tabela 4. Poder calorífico inferior do bagaço em função da umidade

	COMPOSTO PERCENTUAL DE UMIDADE										
H ₂ O [%]	0	10	20	25	30	35	40	46	48	50	52
C [%]	47	42,3	37,6	35,2	32,9	30,5	28,2	25,4	24,4	23,5	22,5
H ₂ [%]	6	5,4	4,8	4,5	4,2	3,9	3,6	3,2	3,1	3,0	2,9
O ₂ [%]	44	39,6	35,2	33	30,8	28,6	26,4	23,7	22,9	22	21,1
PCI [kcal/kg]	4220	3730	3250	3000	2760	2520	2270	1990	1890	1790	1690
PCI* [%]	0	12	23	29	35	40,3	46,2	53	55,2	57,6	60

* Percentual de decréscimo do PCI

Fonte: Peres, 1982.

O PCS, na base seca é considerado sem as perdas de calor pela umidade contida, e é aproximadamente de 4.500 kcal/kg. Para os cálculos da utilização do bagaço como fonte de combustível, normalmente se utiliza o valor de PCI de 1.800 kcal/kg, com 50% de umidade.

Conservação do bagaço

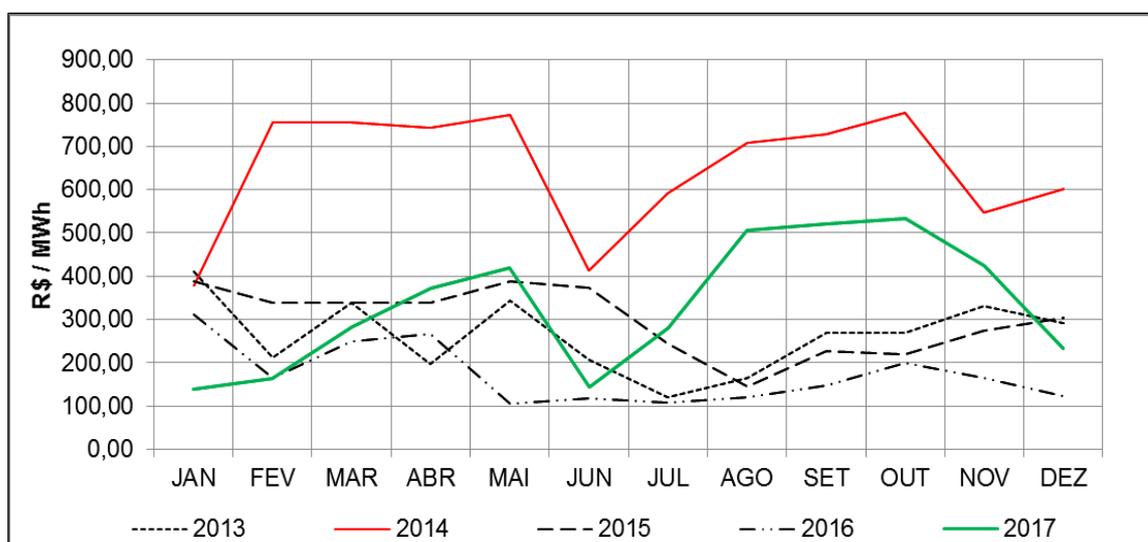
Uma vez que a densidade do bagaço o torna uma matéria prima volumosa, é de difícil armazenamento, pois sua preservação ao ar livre está sujeita a fermentação, apodrecimento e conseqüente perda de grande parte de seu valor como combustível, sendo necessário sua conservação na forma de duna meda, cônica ou piramidal, com inclinação mínima de 30° (Meda é o monte de bagaço, dispostos numa forma relativamente cônica, de forma que possa fazer desviar para os lados a chuva (HUGOT,1977).

2.5 Problemas enfrentados pela geração de energia da biomassa

Imprevisibilidade do preço de venda no MCP

Como a maior parte da energia gerada no país é de fonte hidrelétrica a sazonalidade de geração é dividida entre período de chuvas e período de estiagem. No período de seca, os reservatórios ficam com volume reduzido, acarretando em menor geração. Como alternativa, são acionadas as termelétricas emergenciais, que tem o custo operacional mais caro, e esse custo é repassado ao consumidor final sendo que em 2014 foi o ponto crítico devido à estiagem que vinha ocorrendo desde o ano de 2012 (Figura 4) (EXCÊLENCIA ENERGÉTICA, 2017).

Figura 4. Preço médio da energia Nordeste – Preço de Liquidação das Diferenças.



Fonte: CCEE -2018 – Infomercado mensal.

Instabilidade do preço-teto

Os altos preços da energia elétrica observados no mercado brasileiro de curto prazo durante o ano de 2014, provocados pelo agravamento de uma hidrologia desfavorável iniciada em outubro de 2012, determinaram custos muito elevados para os consumidores de energia elétrica e provocaram um *stress* financeiro severo para empresas de distribuição, de geração (térmica e hídrica) e para consumidores livres. O fato de o preço de curto prazo da energia no PLD ter permanecido durante todo o ano de 2014 em valores bem superiores ao custo médio de produção da energia suscitou fortes questionamentos quanto à qualidade da metodologia adotada na formação dos preços deste insumo estratégico no Brasil (CASTRO et al., 2014).

Desvalorização por compradores do ACL da geração sazonal

A sazonalidade da produção de usinas movidas a biomassa não é aderente ao perfil de consumo no ACL, que são a classe industrial e comercial.

Preços associados a este tipo de energia, proveniente de fontes alternativas, são distintos dos observados na energia convencional e, portanto, não aderentes ao Valor Anual de Referência – VR, valor utilizado para regular o repasse às tarifas dos consumidores finais dos custos de aquisição de energia elétrica, conforme descrito no art. 34 do Decreto nº 5.163, de 2004 (ANNEL, 2016).

Precificação insuficiente do benefício da sazonalidade da geração

Segundo a Excelência Energética (2017), a metodologia de cálculo do Custo Marginal de Operação (CMO) utilizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que no final determina as variáveis Custo de Operação (COP) e Custo Econômico (CEC), não quantifica corretamente o benefício que a produção de energia proveniente do bagaço de cana durante o período seco, distorcendo o princípio do Índice de Custo Benefício (ICB). Isto porque, as simulações realizadas pela EPE não incorporam os procedimentos operativos usados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) na operação real do sistema.

Falta de sinal de planejamento de longo prazo para a biomassa

A ausência de um plano de longo prazo de contratação de energia da biomassa, com metas anuais, impede um ciclo virtuoso na cadeia de produção da bioenergia, vez que não há previsibilidade regulatória aos agentes do setor de que será sempre feito de forma específica, desestimulando investimentos em toda a cadeia (EXCELÊNCIA ENERGÉTICA, 2017).

2.6 Sistema de cogeração

As empresas que possuem os melhores potenciais para cogeração são as que possuem em seu processo produtivo alta demanda térmica, disponibilidade de combustível, simultaneidade de demanda térmica e elétrica.

De forma geral pode-se definir dois conceitos:

Autoprodução: O consumidor produz, nas suas instalações, a energia que necessita: térmica, mecânica e elétrica.

Cogeração: É uma alternativa que pode viabilizar economicamente a autoprodução.

Os sistemas de cogeração, que permitem produzir simultaneamente energia elétrica e calor útil, configuram a tecnologia mais racional para utilização de combustíveis. Este é o caso das indústrias sucroenergéticas e de papel e celulose, que além de demandar potência elétrica e térmica, dispõem de combustíveis residuais que se integram de modelo favorável ao processo de cogeração (SZMERCÁSÁNYI, 1979).

Cogeração é a geração simultânea de energia térmica e mecânica, a partir do mesmo combustível (Gás natural, resíduos de madeira, casca de arroz, bagaço de cana, palha, ponteiros de resíduos de madeira, etc.) sendo que a energia térmica gerada na forma de vapor a uma determinada pressão e temperatura é transformada em energia mecânica e utilizada na forma de trabalho ou transformada em eletricidade por meio de geradores. A energia térmica pode ainda ser utilizada como fonte de calor para um processo industrial (COELHO, 1999).

2.7 Sistemas necessários para produção de vapor e energia elétrica

Do campo ao produto final, uma indústria sucroenergética deve ser considerada como uma gigantesca linha de produção. A colheita, carregamento, transporte, pesagem, pagamento da cana pela qualidade, descarregamento e lavagem, são operações determinantes para um bom desempenho industrial. Estas etapas devem ser realizadas em sincronia com as operações industriais para que não ocorra sobre abastecimento, o que demanda armazenamento, com consequente queda na qualidade ou falta de cana para a moagem, ocasionando atrasos na produção (ALCARDE, 2015).

2.7.1 Campo

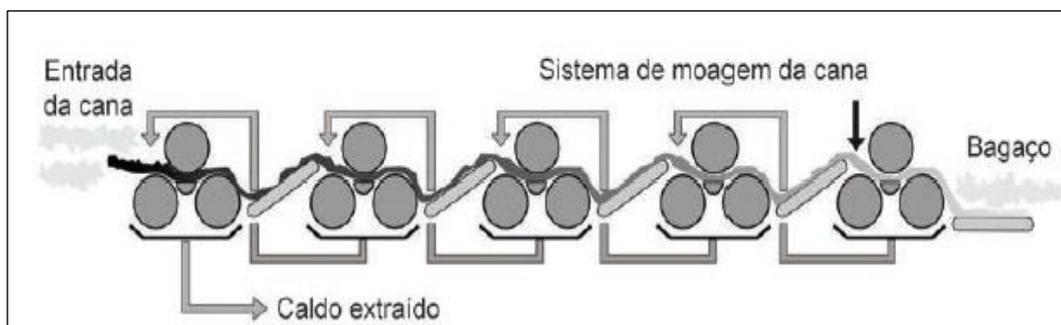
O setor sucroenergético vem buscando a produção sustentável, embora este setor seja bastante criticado pela poluição atmosférica causada pelas queimadas, desmatamento de vegetação nativa para aumentar suas áreas de plantação, contaminação de lençóis freáticos pela irrigação de vinhaça, há também o desenvolvimento de métodos sustentáveis para prevenir que

o aquecimento global atinja maiores proporções, como por exemplo : a substituição das queimadas pela mecanização; a busca por maior produtividade por hectare; pesquisa e desenvolvimento de variedades mais resistentes a doenças e pragas; e de substituição das energias atuais (petróleo e carvão) por energias limpas a partir do bagaço da cana; aliando assim interesses dos setores (MONTEIRO E FERREIRA, 2010).

2.7.2 Moendas

Tradicionalmente a extração de caldo é feita por processo de pressão mecânica dos rolos da moenda sobre o colchão de cana desfibrada (Figura 5). A cana desfibrada chega a primeira moenda dito “1º terno”, recebendo a primeira compressão extraíndo assim o caldo “primário”. O bagaço resultante segue pela esteira intermediária para o “2º terno” de moagem, recebendo novamente a pressão dos rolos. Esmagamentos sucessivos definidos pelo número de moendas são executados nos ternos seguintes, sendo que o bagaço final sai com uma umidade aproximada de 50%, seguindo por esteira de borracha para as caldeiras a fim de ser queimado para produção de vapor. O restante é armazenado no pátio para futura utilização (LOPES et al., 2011).

Figura 5. Representação de um conjunto ou "tandem" de moagem.



Fonte: Lopes et al.,2011

A finalidade da moenda é extrair o maior volume possível de caldo da cana preparada e entregar o bagaço para a caldeira com umidade adequada com 50% de umidade, utilizando a mínima quantidade de energia e água possíveis. Assim deve-se conhecer as diversas possibilidades que as moendas podem fornecer em sua capacidade nominal (HUGOT, 1977). Este fato deve ser observado na hora de definir o aumento de produção de vapor para geração de energia elétrica.

Define-se capacidade de uma moenda como sendo a quantia de cana que ela pode moer por unidade de tempo. Uma moenda está operando economicamente quando ela apresenta uma

extração compatível com as boas práticas de operação. Em geral, o nível de extração econômica varia com as condições do local onde a usina está localizada (LOPES et al., 2011).

Além do preparo da cana, os equipamentos auxiliares de alimentação como calha de alimentação forçada chamada de calha Donelly, rolo de pressão e rolo alimentador também influem na capacidade da moenda. Em geral, o rolo de pressão, que praticamente se constitui num quarto rolo da moenda, aumenta a moagem em 16%. Os rolos alimentadores e a calha de alimentação forçada elevam a moagem em 5% (LOPES et al., 2011).

2.7.3 Caldeiras

Geradores de vapor ou caldeiras são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo (ELEKTRO, 2012).

Segundo Peres (1982), as caldeiras possuem diversas configurações, que afetam sua eficiência na agroindústria canavieira. Entre elas as caldeiras verticais elevadas, possuem capacidade máxima de produção de vapor de 80 t/h, pressão de 32 a 140 kg/cm² e temperatura do vapor entre 350 e 510 °C.

No setor sucroenergético, existe uma particularidade com a utilização das caldeiras em usinas mais antigas, onde o bagaço era visto como um resíduo indesejável e, portanto, seu acúmulo era considerado como incômodo. Assim, não havia uma grande preocupação com a eficiência das caldeiras quanto ao consumo do combustível, no caso, o bagaço. Somente com o despertar para o uso do bagaço como fonte de renda para geração de energia elétrica para venda, é que se passou a ter preocupação com o rendimento das caldeiras, a fim de proporcionar sobra de bagaço (CAMARGO et. al. ,1990)

2.7.4 Turbinas

A turbina é um motor rotativo que converte em energia mecânica a energia de uma corrente de água, vapor d'água ou gás. O componente básico da turbina é o rotor, que conta com paletas, hélices, lâminas ou cubos colocados ao redor de sua circunferência, de forma que o fluido em movimento produza uma força tangencial que impulsiona a roda, fazendo-a girar. Essa energia mecânica é transferida através de um eixo para movimentar uma máquina, um compressor, um gerador elétrico ou uma hélice (SILVA, 2005).

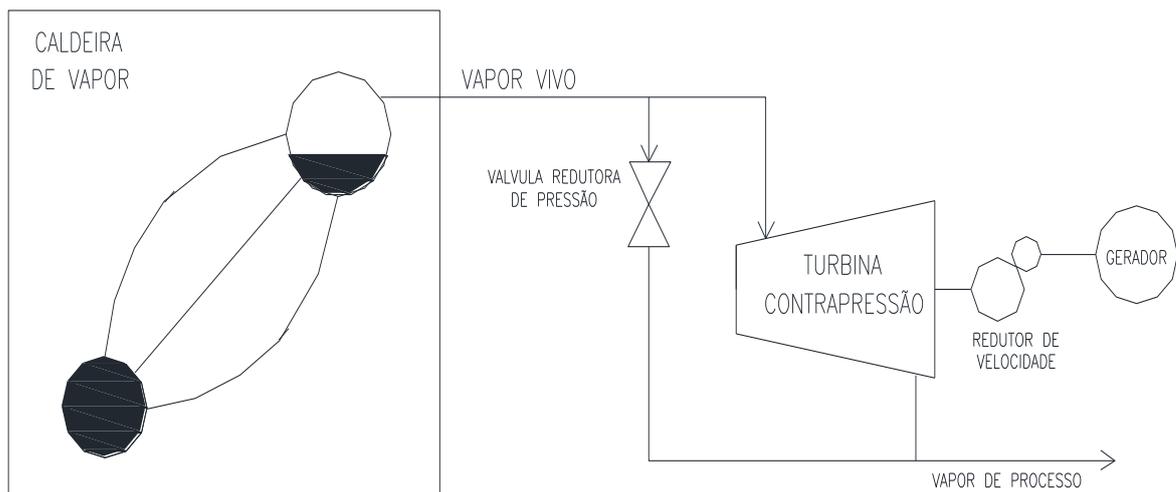
Turbina a vapor

A turbina a vapor é uma máquina térmica que transforma a energia interna do vapor em trabalho mecânico rotativo de um eixo. Nas turbinas a vapor, como em qualquer outra máquina térmica, somente parte da energia do vapor é transformada em trabalho; a parte restante permanece inerente ao vapor descarregado pela máquina. A transformação de energia em trabalho é feita em duas etapas. Na primeira etapa a energia interna do vapor é convertida em energia cinética e na segunda etapa, é transformada em trabalho mecânico (SILVA, 2005).

Turbina de contrapressão

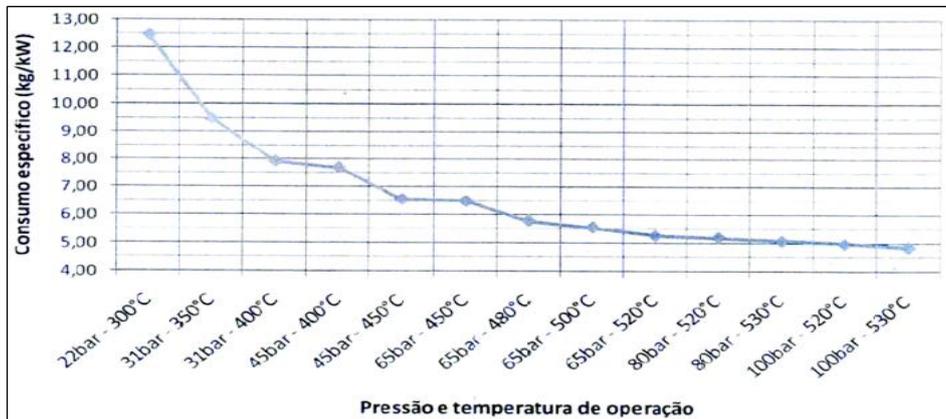
O vapor é expandido na turbina e sai a uma pressão acima da pressão atmosférica, sendo utilizado no processo. O termo contrapressão está no fato de que o vapor de saída está conectado a linha de suprimento de vapor para o processo industrial. O balanço de operação deste tipo de turbina dependerá da necessidade de vapor na usina e será imposta pela demanda de energia térmica necessária dentro do processo industrial (Figura 6), sendo e as pressões utilizadas nas turbinas influenciam no consumo de vapor das máquinas (Figura 7) (MARINO, 2013).

Figura 6. Esquema de uma turbina de contrapressão.



FONTE: Elaborado pelo autor, 2018

Figura 7. Consumo específico de vapor das turbinas de condensação em função da pressão e temperatura



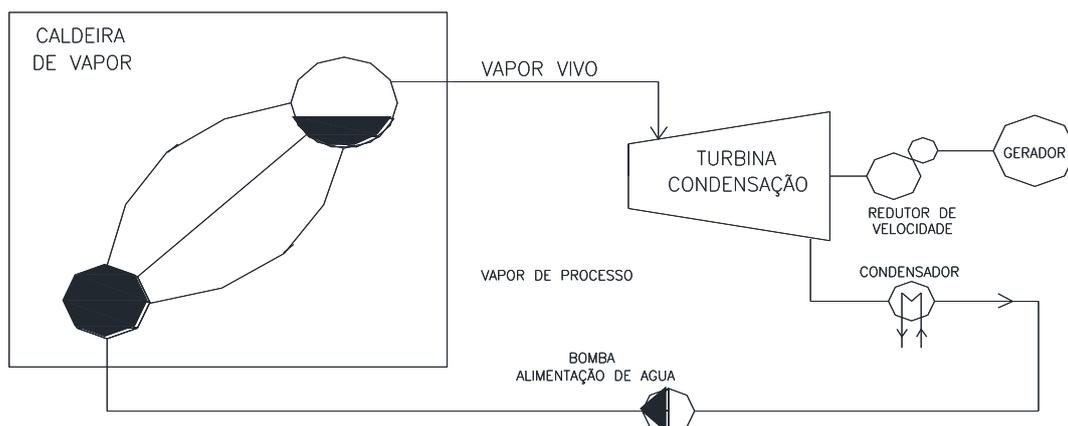
Fonte: Marino,2013

Em usinas de cana-de-açúcar tradicionais, da década de 1990, a pressão mais utilizada é 21 kgf/cm² onde o vapor de alta pressão se expande e sai com pressão de 1,5 kgf/cm², para ser utilizado no processo, especialmente no sistema de evaporação e cozimento do caldo da cana, bem como na destilaria (CAMARGO, 1990).

Turbina de condensação

O Vapor sai abaixo da pressão atmosférica e condensa em equipamentos a vácuo. Este tipo de turbina, são utilizadas exclusivamente para geração de energia, sem conexão de vapor para o processo industrial. A turbina descarrega o vapor de exaustão para um condensador a uma pressão inferior a atmosférica (geralmente alto vácuo) a fim de aumentar a absorção da energia térmica do vapor mediante o aumento da queda de pressão (Figura 8).

Figura 8. Esquema de uma turbina a condensação.

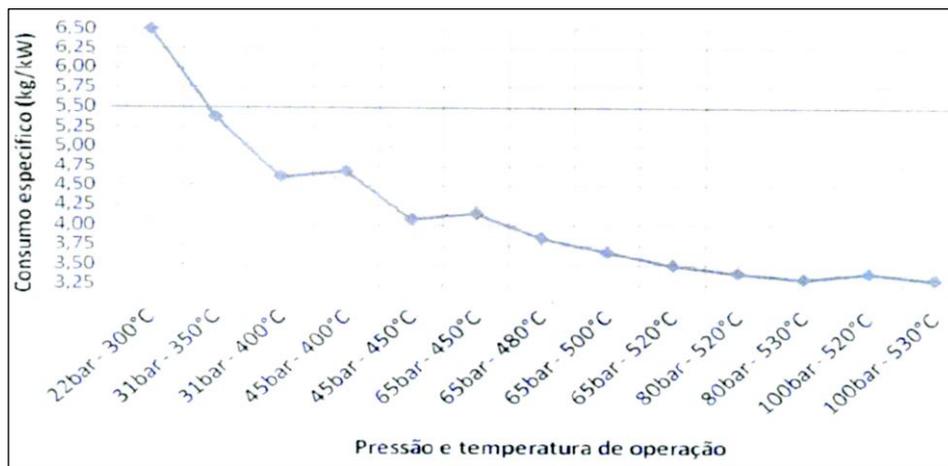


FONTE: Elaborado pelo autor,2018

Neste processo a demanda de vapor estará exclusivamente ligada à geração de energia. Assim se nos casos em que o consumo de energia elétrica for inferior a capacidade de geração do turbogerador, o excedente poderá ser comercializado para a rede da concessionária através de leilões regulados ou no mercado livre (MARINO, 2013).

Na Figura 9, pode ser observado que a utilização de turbina de condensação possui um consumo específico de vapor muito inferior ao da turbina de contrapressão sendo este tipo de turbina ideal para geração de energia elétrica.

Figura 9. Consumo específico de vapor das turbinas de condensação em função da pressão e temperatura



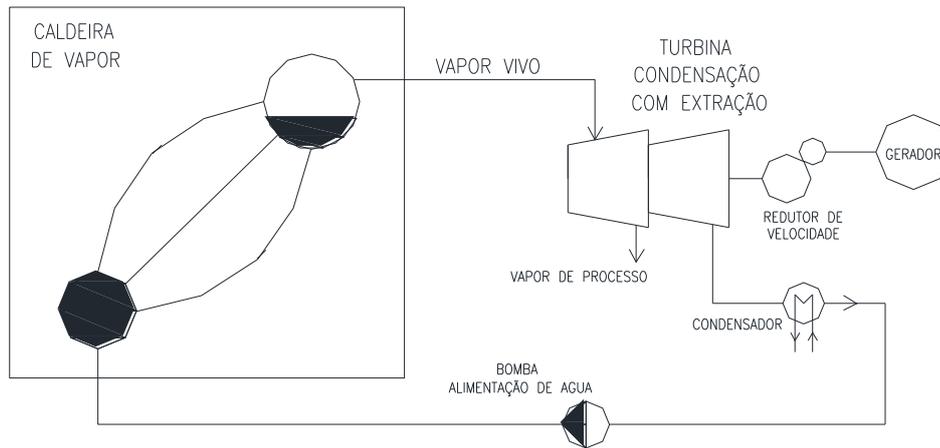
Fonte: Marino,2013

Turbina de extração

Parte do vapor deixa a turbina entre a entrada e a saída, onde um conjunto de válvulas regula o fluxo para a seção de exaustão, mantendo a pressão requerida pelo processo. Pode ser configurada tanto em turbinas de contrapressão quanto de condensação (Figura 10) (MARINO, 2013).

Turbina de pressão mista – Além do vapor de alta pressão, utiliza vapor de menor pressão entrando na parte baixa da turbina. Usada com caldeiras de dupla pressão, ou plantas combinadas com turbinas a gás ou motores a diesel (MARINO, 2013).

Figura 10. Esquema de uma turbina com extração



FONTE: Elaborado pelo autor, 2018

2.7.5 Gerador de energia

Geradores síncronos são máquinas destinadas a transformar energia mecânica em energia elétrica. Toda a energia consumida é proveniente destes geradores. Usualmente os geradores acionados por turbinas a vapor possuem potência de 500 kVA a 150.000 kVA, rotação de 1800 rpm (IV polos) e com tensão de saída de 220 V a 13.800 V – 50 e 60 Hz (WEG, 2017).

No setor sucroalcooleiro, o atendimento energético é realizado pelo ciclo Rankine, onde o combustível (bagaço de cana) é queimado na caldeira para produção de vapor. Em seguida, o vapor se expande na turbina e produz trabalho mecânico, acionando um gerador (CORREA NETO, 2002).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada durante o período de 2017 a 2018, na Usina Utinga Leão (Figura 11), localizada no município de Rio Largo, a 30 quilômetros do porto de Maceió. A definição da região de estudo desta usina foi feita em função de um levantamento no Estado, levando-se em consideração a identificação de unidades que possuíssem médias históricas de moagem de 1 milhão de toneladas de cana e não vendesse o excedente de energia elétrica.

Figura 11. Imagens usina Utinga Leão



Ano:1956

Fonte: IBGE,2018



Ano:2018

Fonte: Sindaçucar,2018

A área cultivada dessa usina é de 7.331,18 ha, sendo 4.963,90 ha (67,71%) de área plana de chã, 1.123,77 ha (15,33%) de várzeas, áreas mais favoráveis ao plantio e 1.243,51 ha (16,96%) de área de encosta. No futuro, a área de encosta sem a possibilidade de colheita mecanizada (sem queima), forçará a busca por novas áreas de plantio e aumento da produtividade das áreas de chã e várzea, que juntas somam 83,04 % do total de área cultivada.

Nessa usina não há colheita mecanizada e em 2018 a área irrigada foi de 4.762 há (64,96%), com energia comprada da concessionária de energia, porque a geração própria é consumida em sua totalidade pela indústria.

A metodologia empregada baseou-se em levantamento de dados, no campo e na indústria. As informações do campo referiram-se aos dados da produção de cana de açúcar, tipo de relevo, nível de mecanização da colheita e percentual de cana irrigada, utilizando-se um questionário semiestruturado e dados gerais da região. As informações da indústria foram baseadas no potencial de geração de vapor das caldeiras existentes e o consumo de vapor nas turbinas de acionamento dos equipamentos. O consumo de bagaço equivalente necessário para geração de vapor, assim como para atendimento das máquinas a vapor e a sobra de bagaço excedente, também foram calculados.

O potencial de geração de energia elétrica na situação existente para consumo interno foi avaliado e sobra para venda e o prazo de retorno estimado para os possíveis preços de venda no PLD que pudesse viabilizar o investimento proposto no processo produtivo. Foram ainda avaliados os tempos de retorno com base nos preços que pudessem viabilizar a proposição apresentada.

3.1 Variáveis do sistema de produção

A análise de geração de bagaço para suprir a geração de vapor para produção de eletricidade, força motriz e utilidades no processo levaram em consideração uma velocidade de moagem constante. A velocidade de moagem adotada considera que, para se manter as caldeiras em operação, é suficiente para garantir o consumo elétrico interno na usina, que se mantém constante para qualquer produção de cana para moagem considerada, uma vez que os preços para venda no PDL tiveram uma variação acentuada no período avaliado entre os anos de 2013 a 2017. Por isso foi fixada uma faixa de preços dentro da variação para análise do retorno financeiro com a venda.

Considerou-se o aproveitamento de um dos geradores existentes na usina de capacidade de 3 MW para ser usado na entressafra, e como existe a necessidade de consumo interno para manter o sistema de geração em funcionamento, adotou-se a energia para venda de 2,2 MW.

3.2 Dados agrícolas e industriais

3.2.1 Total de cana-de-açúcar processada por safra

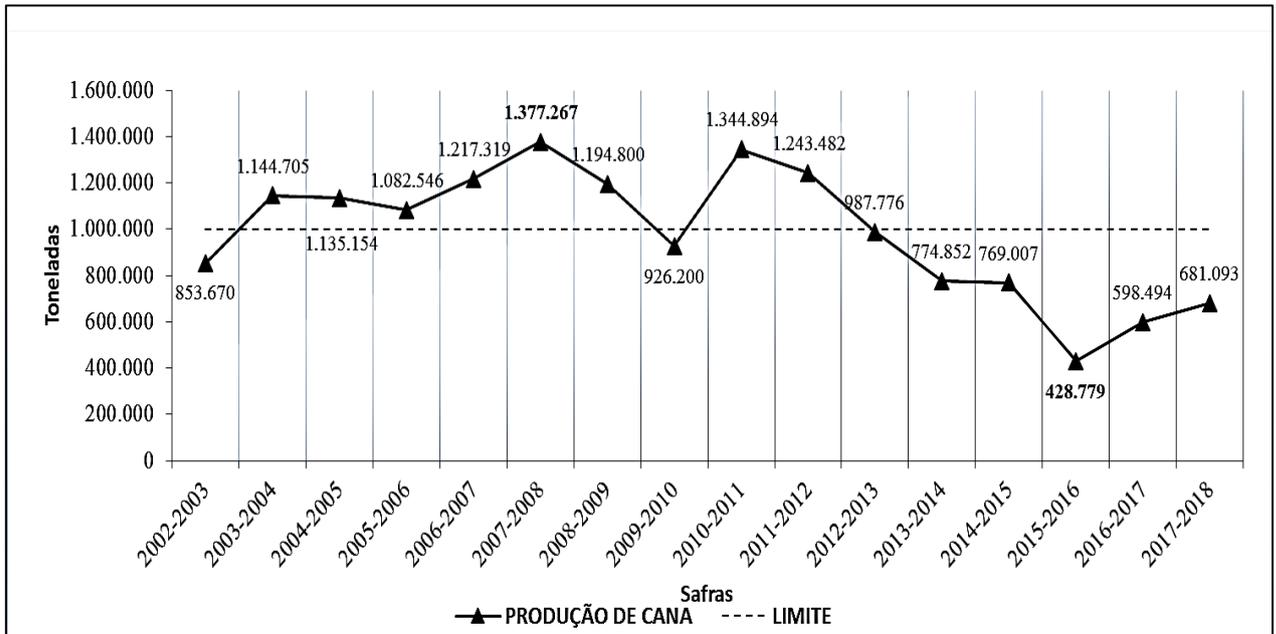
A produção de cana-de-açúcar da usina entre os períodos das safras de 2002-2003 até a safra 2017-2018 (Sindaçucar, 2018) (Figura 12), é essencial para verificação das condições de um potencial de bagaço disponível,

Verificou-se que a usina possui capacidade técnica de produção de cana compatível com a necessidade de produção maiores que 1 milhão de toneladas, capaz de gerar uma quantidade de bagaço suficiente na entressafra, como pode ser comprovado nas safras 2003-2004 a 2012-2013 para gerar energia elétrica que retornasse o investimento necessário, num período de 4 anos, com um preço de venda satisfatório.

A queda sucessiva ocorrida entre as safras 2013-2014 a 2015-2016 vem sendo revertidas (Figura 12) e verifica-se uma curva de recuperação da produção de cana que poderá trazer a usina novamente a patamares que viabilizem a proposta de investimento em um sistema de turbina de condensação para geração de energia na entressafra.

Foram simuladas as seguintes moagens para a Usina em estudo: 1.600.000, 1.400.000, 1.200.000, 1.000.000, 800.000 e 600.000 toneladas de cana.

Figura 12. Produção de cana-de-açúcar na usina Utinga Leão



Fonte: Sindaucar AI, Dados estatísticos

3.2.2 Capacidade de moagem

A capacidade de moagem é o limite mínimo da taxa de moagem que permite a geração de vapor suficiente para atender a todas as necessidades de processo de fabricação de açúcar e álcool sem a utilização de energia elétrica comprada da concessionária. Existe um limite máximo imposto pelo fabricante das moendas que é função de seu tamanho.

Brunelli (2011) apresentou uma metodologia, que leva em conta os fatores mecânicos e da matéria-prima (Cana-de-açúcar) para o cálculo da capacidade de moagem, em que é levado em conta a densidade da cana a ser moída, conforme Equação 1.

$$TCh_{MAX} = \frac{47,12.D^2.L.n}{\left(\frac{0,97}{dc}\right) - (0,47.f)} \quad (1)$$

em que: TCh = Moagem de cana [t/h]; n = Rotação da moenda [rpm]: Varia de 1 a 19; D = Diâmetro do rolo da moenda [m]; L = Comprimento do rolo da moenda [m] e d_c – Densidade da cana [$t.m^{-3}$]

O equipamento que controla a densidade da cana é chamado de Calha Donnelly ou Chute Donnelly. Consiste de uma calha com certa altura, fechada totalmente, com seção transversal retangular e com abertura divergente no sentido de alimentação da moenda. Quando se enche a

calha, pelo próprio peso formado pela coluna de cana preparada, a densidade no fundo será elevada. Esta densidade é da ordem de 0,50 a 0,55 t.m⁻³, tornando a alimentação eficiente e possibilitando elevada moagem e extração de caldo (CTC, 1999).

Parâmetros utilizados para a moenda da usina em estudo:

Tamanho da moenda: 42" X 84" (Diâmetro x Comprimento); Diâmetro do rolo: D = 1,067 m; Comprimento do rolo: L= 2,134 m; Rotação da moenda: n = 5,92 rpm; Densidade da cana moída: dc = 0,5 t.m⁻³; Teor de fibra: f =15%.

Além das características da moenda (D, L e n), a fibra tem pouca influência no resultado da capacidade de moagem, inclusive aumentando a capacidade com seu crescimento. A densidade da cana no fundo do Donnelly é o item que possui maior influência na capacidade. Portanto, é muito importante cuidar dos fatores que influem na densidade, como a altura da cana no Donnelly, a morfologia de cana (variedade, maturação, isoporização, etc.) e as impurezas vegetais (BRUNELLI, 2011).

A Usina em estudo possui a maior moenda entre todas instaladas no Estado, o que pode ser um fator interessante para velocidade do seu processamento de cana, pressupondo-se com isso que a safra transcorra num menor tempo possível. Conforme definido na Equação 1, foi calculada a capacidade máxima de moagem [TCh] utilizada operacionalmente pela usina em 408 [t/m³] (Função da capacidade das moendas).

Essa taxa de moagem poderá ser modificada durante a safra em função de algum acontecimento extraordinário, como a necessidade de redimensionamento por quebra de safra. Para a usina do estudo a demanda de energia elétrica é alta e, portanto, em qualquer condição a moagem deve atender a capacidade máxima das caldeiras, trabalhar a plena carga.

3.2.3 Tempo de moagem

Este parâmetro, determinado na Equação 2, permite que seja estimado o tempo de moagem em meses e assim avaliar o tempo de duração da safra.

$$\text{Tempo de moagem} = \frac{\text{Tempo total de moagem em dias}}{30 \text{ (dias do mês)}} \quad [MESES] \quad (2)$$

Foi considerado nesse cálculo a eficiência de moagem que normalmente se encontra entre 80 e 90%, sendo comum uma média de 85% como um parâmetro aceitável. Neste

parâmetro são consideradas quebras eventuais, parada para reparos rotineiros e uma eventual falta de cana em decorrência de chuvas excessivas ou outros inconvenientes.

3.2.4 Bagaço gerado na safra

Para se definirem alguns parâmetros importantes na modelagem da safra, são necessárias algumas definições quanto a cana a ser moída, como descrito na Tabela 5, baseado nos parâmetros básicos da composição física do bagaço apresentados nas Equações 3 e 4:

Tabela 5. Variação média do bagaço.

Índices	Variação	Valor utilizado
Umidade do bagaço	45% a 50%	50%
Fibra da cana %	11 % a 16%.	15%
Fibra contida no bagaço %	41 % a 47,5%.	46%
Relação bagaço/cana %	25 % a 29%.	29%

Fonte: Hugot (1977) e Peres (1982)

$$\text{Bagaço gerado por hora} = \frac{\text{Taxa de moagem [TCh]} * \text{Fibra da cana [\%]}}{\text{Fibra contida no bagaço [\%]}} [\text{tb/h}] \quad (3)$$

$$\text{Bagaço total gerado na safra} = \frac{\text{Total da cana prevista para moagem [t]}}{\text{Relação } \frac{\text{bagaço}}{\text{cana}} [\%]} [\text{t}_b] \quad (4)$$

3.2.5 Utilização do bagaço da cana para paradas programadas e eventuais

Baseado na experiência de cada usina, pode variar de 4% a 12%. Segundo Camargo et al. (1990) a média de excedentes de bagaço nas usinas com destilarias anexas é de no máximo 6%. Para o presente estudo de caso, foi utilizado 5% para paradas eventuais, conforme Equação 5.

$$\text{Bagaço para paradas (bp)} = \frac{\text{Quantidade total de bagaço gerado [tb]}}{\text{percentual reservado para paradas[\%]}} [\text{t}_b] \quad (5)$$

3.2.6 Consumo de vapor e bagaço para o estudo

Na determinação do consumo de vapor e de bagaço, foram utilizadas 2 metodologias. Uma por cálculo termodinâmico (calculado) e o outro por casos típicos de levantamentos energéticos (estimado), realizados por Camargo (1990) em 238 caldeiras, agrupadas em 180 modelos, em usinas do setor sucroenergético.

- **Consumo de vapor**

Considerada a produção nominal das 3 caldeiras em operação conforme Tabela 6.

Tabela 6. Dados técnicos das caldeiras

Caldeira	Prod. (t/h)	Pressão (kgf/cm ²)	Temp. °C	Entalpia vapor* (kcal/Kg)	Eficiência da Caldeira	Temp. água p/caldeiras. (°C)	Entalpia H ₂ O (kcal/Kg)
1	70	24	340	737	78%	90	115,42
2	70	24	340	737	78%	90	115,42
3	70	24	340	737	78%	90	115,42
Total	210						

*Entalpia do vapor para 21 kgf/cm²

Fonte: Levantamento de campo, 2017

- **Consumo de bagaço**

Através das equações pelo método termodinâmico aplicado no processo, a vazão mássica de vapor [m], segundo Santos (2012), descrito pela Equação 6:

$$m = \frac{PCI_{50\%} \cdot Q}{H_2 - H_1} \cdot \eta \text{ [t.h}^{-1}\text{]} \quad \text{Rescrevendo vem:} \quad \frac{m}{Q} = \frac{PCI_{50\%}}{H_2 - H_1} \cdot \eta \text{ [Adimensional]} \quad (6)$$

Em que: m = Vazão mássica de vapor [t.h⁻¹]; PCI = Poder calorífico inferior do bagaço com 50% umidade [kJ.Kg⁻¹]; Q = Vazão do combustível (Bagaço) [t.h⁻¹]; H₁ = Entalpia da água de alimentação da caldeira [kJ.Kg⁻¹]; H₂ = Entalpia do vapor que sai da caldeira [kJ.Kg⁻¹]; η = Rendimento da caldeira [%].

Consumo horário de vapor, de acordo com Santos (2012), conforme obtida pela Equação 7:

$$V_h = \frac{V_e \cdot C_h}{1.000} \text{ [t.h}^{-1}\text{]} \quad (7)$$

Em que: V_h = Consumo horário de vapor [t.h⁻¹]; V_e = Consumo específico de vapor [kg.t⁻¹] e C_h = Moagem horaria da cana [t]

O consumo de bagaço (b_h) foi obtido por cálculo conforme Equação 8:

$$b_h = \frac{V_h}{m/Q} \text{ [t.h}^{-1}\text{]} \quad (8)$$

Substituindo os valores de V_h da Equação 7 e (m/Q) da Equação 8, na Equação 9:

$$b_h = \frac{(V_e \cdot C_h) / 1.000}{PCI / (H_2 - H_1)} \quad (9)$$

Reescrevendo a formula, tem-se a Equação 10:

$$b_h = \frac{V_e \cdot C_h}{1.000} \cdot \frac{H_2 - H_1}{PCI \cdot 50\% \cdot \eta} \text{ [t/h]} \quad (10)$$

A Equação 10 foi utilizada para cálculo do consumo de bagaço. Os parâmetros da equação são encontrados na Tabela 6.

Para validação dos dados calculados foi realizado uma comparação com os índices de produção de vapor e consumo de bagaço encontrados na literatura do setor e que são utilizados pelas usinas nas suas avaliações de moagem.

- **Consumo de vapor**

Hugot (1977) informa que uma usina moderna produzindo açúcar demerara na década de 1990, como é o caso da usina em estudo, o consumo pode variar de 450 a 550 kg de vapor por tonelada de cana.

Camargo et al. (1990) determina um consumo específico (V_e) médio: 500 kg vapor por cana, podendo variar de 405 a 638 [kg Vapor por tonelada de cana], conforme Equação 11:

$$\text{Consumo de vapor} = \frac{V_e \times C_h}{1.000} \text{ [t. h}^{-1}\text{]} \quad (11)$$

onde: V_e = Consumo específico de vapor [kg.t^{-1}]; C_h = Moagem horária de cana [t]

Foi considerado um consumo específico de vapor por tonelada de cana de 450 kg/t, por ser este valor representar melhor as caldeiras de 60 t/h de vapor que aumentaram sua capacidade para 70 t/h após reformadas.

- **Consumo de bagaço**

De Camargo et al. (1990):

Relação vapor/bagaço: 1 Kg bagaço (50% unidade): Varia de 2 a 2,15 Kg vapor

Assim pode ser estimado, conforme Equação 12:

$$\text{Consumo de bagaço} = \frac{V_e}{\text{relação} \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg bagaço}}} \text{ [t. h}^{-1}\text{]} \quad (12)$$

Foi considerada a relação de 2,15 kgv. Kg^{-1} bagaço, por ser este o valor utilizado pela usina para suas avaliações de moagem.

3.2.7 Consumo de vapor por hora para turbinas.

Em uma condição ideal estes valores deveriam ser acompanhados através de instrumentos de medição de vazão a serem instalados na admissão de alta pressão das máquinas. Como isso não foi possível, pois exigiria a aquisição e montagem de equipamentos de alto valor, não foi medido o valor exato de consumo, adotando-se então valores fornecidos e usados pela usina nas suas análises energéticas.

Resultado da multiplicação do consumo específico de vapor [Kgv.CVh^{-1}] pela moagem especificada para vazão, definida, conforme Equação 13.

$$\text{Consumo do equipamento} = \frac{\text{Consumo específico de vapor} \times \text{TCh}}{1.000} \quad [t. h^{-1}] \quad (13)$$

Os valores de potência nominal informados foram obtidos na placa de identificação dos equipamentos e nas folhas de dados dos mesmos. Normalmente são expressos em CV (Cavalo-vapor) ou kW (kilo Watts), com a informação do consumo específico de vapor expresso em kgv/CV ou kgv/kW conforme Tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Consumo de vapor nas turbinas nos acionamentos mecânicos.

Equipamento	Fabricante Modelo	Equip.	Potência [CV]		Cons. Esp. kgv/cv	Cons. Vapor tv/h
			Nom.	Efetivo		
Picador	WEG	Elétrico	1.551	---	---	---
Desfibrador	TEXAS 2440	Turbina	2.998,8	2.998,8	10,00	29,99
1° terno moenda	TGM TM1000	Turbina	1.776,0	1.776,0	8,44	14,99
2° terno moenda	ELIOT 2DYRPG	Turbina	738,24	738,24	11,50	8,49
3° terno moenda	ELIOT 2DYRPG	Turbina	738,24	738,24	11,50	8,49
4° terno moenda	ELIOT 2DYRPG	Turbina	738,24	738,24	11,50	8,49
5° terno moenda	ELIOT 2DYRPG	Turbina	738,24	738,24	11,50	8,49
B. água Cald.	GM TS 1000	Turbina	708,36	708,36	14,25	10,09
Σ consumo das turbinas			9.987,12	8.436	-	89,03

Fonte: Levantamento de campo, 2017

3.2.8 Consumo de bagaço por hora para geradores.

Resultado da razão do consumo específico de vapor [kgv/CVh] pela moagem especificada para vazão foi calculado conforme Equação 14.

$$\text{TCh / equipamento} = \frac{\text{CV/TCh}}{\text{TCh}} \quad (14)$$

Demais equipamentos são de acionamento elétrico inclusive com vários motores de grande potência e alimentados em média tensão.

Tabela 8. Consumo de vapor nas turbinas nos geradores de energia elétrica.

Equipamento	Fabricante Modelo	Pot. Inst. kW	Pot. Consumida kW	Cons. Esp. kg/KWh	Cons. Vapor tv/h
Turbina G1	TURBODYNER 1TS6	3.100	3.100	11,50	35,65
Turbina G 2	TURBODYNER 1TS6	3.100	3.100	11,50	35,65
Turbina G 3	AKZ A-50	3.500	3.500	10,50	36,75
Σ consumo Geração		9.700	9.700		108,05

Fonte: Levantamento de campo, 2017

Consumo de vapor e bagaço para a entressafra conforme proposta do estudo

Consumo específico de vapor turbina de condensação: 8,00 [kgf/kWh]

Consumo de vapor para potência pretendida: $8 \times 3.000 = 24,00$ [tv/h]

Vazão do bagaço de retorno para alimentação da caldeira [t/h]: Obtida pela Equação 10.

3.2.9 Bagaço para produção de torta de filtros

Considerando Camargo et al. (1990), o consumo de bagaço em toneladas para produção de torta de filtro é de 7 kg.t^{-1} .

Assim para cada valor de moagem considerado, pode ser calculado pela Equação 15:

$$\text{Bagaço para torta} = \frac{7}{1000} \cdot (\text{moagem})^{-1} [t] \quad (15)$$

3.2.10 Bagaço entressafra

A quantidade geral de bagaço para entressafra é avaliada considerando a subtração do:

Bagaço para entressafra = Produção total de bagaço (Equação 6) - Consumo de bagaço na safra - bagaço reservado para partidas (Equação 7) - bagaço para filtros (Equação 17).

Uma vez que existe ainda uma perda de bagaço na armazenagem no pátio de estocagem, será considerado 3% de perdas totais, sendo que uma das causas é a ação do vento e a outra ocorre é pela ação da fermentação na meda.

3.2.11 Sistema elétrico da usina

Conforme o diagrama unifilar apresentado no Apêndice 4, possui as seguintes características básicas:

- Entrada de energia da concessionária na tensão de 13,8 kV alimentando o barramento, porém com um diferencial interessante para aproveitamento das diferentes tarifas do mercado, com utilização de medição com industrial, tarifa irrigante rural e tarifa rural, o que possibilita um melhor aproveitamento da potência comprada da concessionária.
- Esta usina possui um arranjo elétrico único no estado, com 3 geradores de 3.000 kW gerando numa tensão de 4,16 kV, uma vez que os motores de várias cargas são alimentados nessa tensão. Este é o principal motivo do maior consumo elétrico na usina ser alto, no limite de aproveitamento dos geradores, não havendo possibilidade de sobra de energia elétrica para a irrigação ou mesmo para venda de excedente durante a safra.

3.2.12 Carga necessária a manter uma caldeira em operação na entressafra

Para determinação da quantidade de energia elétrica poderá ser posta à venda, inicialmente devem ser avaliadas as condições gerais do sistema elétrico com a verificação do carregamento do gerador.

A premissa inicial é que a usina está sendo suprida pela concessionária de energia elétrica e para que uma caldeira entre em operação é necessário que inicialmente a caldeira seja alimentada com bagaço proveniente do pátio. Para isso, o sistema de transporte de bagaço de retorno do estoque no pátio deve ser acionado e uma pá carregadeira deve iniciar o processo de adição de material na esteira, para que a caldeira então seja alimentada com combustível.

Iniciada a queima do combustível, normalmente de forma manual, a caldeira inicia a queima de bagaço. Logo em seguida, para fornecimento de ar de combustão e tiragem do ar forçado, os ventiladores são ligados. Necessário também é que a bomba de alimentação de água para caldeira esteja ligada, a fim de manter o nível de água nos tubulões de vapor estáveis.

A partir deste momento é aguardada a caldeira atingir seu valor nominal de pressão e temperatura para liberação de vapor para a turbina do primeiro gerador. Assim que o gerador atinge o valor de tensão nominal, é feito um paralelismo entre a barra de geração e a barra da concessionária e é feita a comutação para a barra do gerador, ficando a usina isolada do sistema da concessionária. Para a usina ficar autônoma de fornecimento de energia elétrica externa, são sucessivamente postos em operação as outras caldeiras e, conseqüentemente, as turbinas das moendas. Inicia-se assim o processo normal de moagem (Apêndices 4 e 5).

Os geradores vão sendo ligados, postos em paralelo e sua potência é liberada a medida que o consumo de energia vai aumentando. Foi determinado o valor de consumo de energia mínima para manter uma caldeira em operação e no caso da proposição do estudo foi

contemplado também outros equipamentos que necessitem para o funcionamento do sistema de geração de energia fora da safra.

Para manter o sistema operando foi considerado 800 kW, sendo:

- Torre de resfriamento funcionando para resfriamento do vapor exausto da turbina.
- Ventilador de tiragem de ar da caldeira em operação.
- Bomba de alimentação de água para a caldeira em operação
- Elevador de retorno de bagaço do pátio.
- Esteira de borracha para alimentação da caldeira em operação.
- Iluminação da área operacional.

Estimada uma produção de energia elétrica de 3.000 kW e um consumo interno para manter em operação o sistema na entressafra de 800 kW, sobram 2.200 kW para venda efetiva de energia.

3.3 Levantamento de custo de equipamentos

Para a análise financeira da proposição de instalação de uma turbina de condensação foi solicitada a Empresa TGM Turbinas, um orçamento budget a fim de obter um valor dentro da realidade de mercado. Este orçamento foi fornecido pela sede da empresa, situada na cidade de Sertãozinho, São Paulo, pelo setor de desenvolvimento de negócios. Esta empresa possui vários equipamentos instalados nas Usinas de Alagoas. Para este estudo foi considerada uma turbina de condensação de 3.000 kW, modelo TMC 3000, pressão de entrada de vapor de 21 Kgf/cm², temperatura de vapor de 300 °C. O consumo específico de vapor é de 8 kgv/kW.

O trocador de calor necessário para esta turbina é 39 m³.h⁻¹ + 80 m³ para o gerador, considerando este gerador refrigerado a água, com temperatura de entrada de 32 °C e saída de 37 °C. A Usina já possui um sistema de refrigeração. Assim este equipamento entraria somente para interligações de tubulações de entrada e saída de água, sendo considerado no custo como investimento.

Outra necessidade observada é a de aquisição de um condensador de vapor para 900 m³/h, com temperatura de entrada de 32 °C e saída de 42 °C. Este equipamento deve ser adquirido pela Usina porque não existe na planta.

Os preços estimados para aquisição e montagem do sistema estão na Tabela 9.

Tabela 9. Estimativa de custo do empreendimento.

Equipamentos e serviços	Valor
Turbina a Vapor TGM modelo TMC 3000, Sistema hidráulico completo, Sistema de proteção e controle, Sistema de condensação a vácuo e Acessórios	R\$ 3.070.000,00
Redutor de velocidade TGM de eixos paralelos, bi helicoidal, modelo TRS e acessórios	R\$ 210.000,00
Serviços de Supervisão a instalação, Comissionamento, Partida e treinamento	R\$ 240.000,00
Serviços de construção civil, aquisição e montagem de tubulações e válvulas, interligações elétricas e acessórios e mão-de-obra de montagem	R\$ 408.580,00
Transporte de São Paulo-Alagoas (2%)	R\$ 71.420,00
TOTAL GERAL	R\$ 4.000.000,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

3.4 Análise do preço de energia

Os valores médios para o PLD, considerados neste estudo foram: 240, 280, 320 e 360 R\$/MWh para cada produção de cana de cada safra.

3.5 Tempo total de produção de energia na entressafra

O tempo de moagem é uma razão entre o total de bagaço acumulado na entressafra e a vazão de bagaço necessária a produção de vapor para geração de 3.000 kWh.

Tempo total em horas pode ser calculado pela Equação 16:

$$\text{Tempo de geração} = \frac{\text{Tempo total de geração em dias}}{30 \text{ (dias do mês)}} \quad [\text{Meses}] \quad (16)$$

3.6 Análise da viabilidade econômica

A avaliação econômica é essencial para a tomada de decisão de investir em quaisquer melhorias propostas em uma planta industrial. Basicamente porque os custos, normalmente são elevados, e o retorno desse investimento deverá ser em um prazo razoável. Para isto são utilizadas ferramentas da economia que permitem avaliar com melhor assertiva os custos apresentados.

Valor Presente Líquido

O valor presente líquido (VPL), também conhecido como valor atual líquido (VAL) ou método do valor atual, foi calculado conforme Equação 17 (PEREIRA et al., 2016):

$$VLP = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (17)$$

em que: i = Taxa de desconto [%]; t = (t=0 a t=n) em anos de todo fluxo de caixa; FC_t = Fluxo de Caixa anual do Projeto [R\$]; n = número de períodos do fluxo [Anos]; I_0 = Investimento Inicial [R\$]; n = Tempo de desconto do último fluxo de caixa [Anos]

A Equação 21 determina o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial.

Para que o VAL seja positivo, o retorno esperado do investimento deve ser maior que o seu custo de oportunidade. Portanto, uma elevação no custo de oportunidade do investimento, isto é, da taxa de juros, implicará em uma redução no VAL do projeto, podendo até torná-lo negativo em dado horizonte de planejamento.

Os valores aceitáveis de VPL deverão ser positivos e acima de R\$ 1.500.000,00 sendo que o valor de custo de capital foi definido em 5%, representado pela taxa de juros que as empresas usam para calcular, descontando ou compondo, o valor do dinheiro no tempo. O BNDES FINAME que financia equipamentos não define uma taxa, sendo negociado caso a caso.

Taxa Interna de Retorno

Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de juros que torna o valor presente das entradas de caixa igual ao valor presente das saídas de caixa do projeto de investimento é calculada pela Equação 18 (PEREIRA et al., 2016):

$$TIR = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} = -FC_0 \quad (18)$$

em que: FC_j = Valor presente das entradas de caixa [R\$]; FC_0 = Investimento Inicial [R\$]; i = Taxa de desconto [%]; j = Tempo de desconto de cada entrada de caixa [Anos];

A TIR é um dos indicadores essenciais em análises de retorno de projetos ou estimativa de preços de empresas (valuation). Os termos mais famosos para estudos do gênero são viabilidade econômica com as variações econômico-financeiras ou técnica-econômicas.

A TIR é uma taxa que é mais indicada para fluxos de caixas mais simples (por exemplo, primeiro período negativo e os futuros positivos). Além disso, em alguns casos, podem existir conflitos entre o VPL e a TIR. Quando isso ocorrer, sugere-se seguir o VPL.

Os valores aceitáveis de TIR deverão ser **superiores a 25%**, considerando uma receita durante o ano apenas na entressafra, pelo período de 4 anos.

Payback simples- PBS ou ROI

Retorno sobre Investimento (ROI) - indica o percentual de retorno sobre o investimento realizado, é calculado pela Equação 19 (PEREIRA et al., 2016):

$$PBs (\%) = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Ganho no período}} \quad (19)$$

Período de Payback ou Tempo de Payback ou simplesmente Payback, é o tempo necessário para que se tenha o retorno sobre o investimento em um projeto. A partir do momento do payback, o projeto passa a ser vantajoso do ponto de vista financeiro.

O payback é visto como um indicador de risco de projeto, por isso, todo plano de projeto ou novo negócio deve ter como prioridade, minimizar seu payback. Payback ocorre no ano em que o fluxo de caixa acumulado passa a ser positivo.

Na prática o payback simples não é muito utilizado porque não leva em consideração uma taxa de juros para correção do dinheiro no tempo.

O Payback simples deverá retornar em no máximo em 4 anos, sendo esse o tempo máximo de anos previsto para retorno do investimento, sem considerar os valores mensais, pois a receita acontece em apenas em um período do ano (na entressafra).

Payback descontado

Payback descontado é o período de tempo necessário para recuperar o investimento avaliando-se os fluxos de caixa descontados, ou seja, considerando-se o valor do dinheiro no tempo. É calculado pelo emprego da Equação 18 (PEREIRA et al., 2016):

$$FCC(t) = -I + \sum_{j=1}^t \frac{(R_j - C_j)}{(1+i)^j} \quad 1 \leq t \leq n \quad (18)$$

em que: FCC_t = Valor presente do capital ; R_j = Receita proveniente do ano j [R\$]; C_j = Custo proveniente do ano j [R\$]

O Payback descontado, assim como o payback simples, deverá retornar em no máximo 4 anos que é o prazo máximo de anos previsto para retorno do investimento. Aqui também não

são considerados os valores mensais pois a receita acontece em um período do ano (na entressafra).

Índice de lucratividade

O Índice de Lucratividade (IL) é o indicador para saber a capacidade do seu empreendimento em gerar lucros a partir do projeto desenvolvido. É calculado pela Equação 19 (PEREIRA et al.,2016):

$$IL = \frac{VP[R\$]}{I_0 [R\$]} [Adimensional] \quad (19)$$

em que: IL= Índice de lucratividade [%]; VP = Valor presente das entradas de capitais [R\$];
I₀ = Investimento inicial

Este índice estabelece a razão entre o valor presente das entradas líquidas de caixa do projeto e o investimento inicial.

O valor do Índice de Lucratividade admitido para o estudo será de 1,25, uma vez que o investimento deve retornar em 4 anos, ou seja, retorna 25 % ao ano.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tempos de moagem em função das safras de cana-de-açúcar da usina

Baseado na metodologia apresentada, os valores calculados estão apresentados na Tabela 10, para cada safra proposta, conforme Equação 2.

Tabela 10. Tempos de moagem para safras simuladas da usina.

Tempo de moagem	Moagem [t]			
	1.000.000	1.200.000	1.400.000	1.600.000
Em meses*	4	4,8	5,6	6,4

* Considerando eficiência da usina de 85%

Fonte: Resolução da equação 2.

Estas informações servem para programação da estimativa de custos da usina durante a safra, como: Mão-de-obra temporária; aluguel de equipamentos, gasto de combustível entre outros.

O aumento da produção de cana de 200.000 toneladas por safra não traz um aumento linear no tempo de moagem, sendo encontrado valores de 20%,16,6% e 14% para cada incremento. Isto se revela um fator positivo, pois o aumento da escala de produção além do próprio produto gerado (açúcar e etanol) tem custos menores na logística e, portanto, maior rentabilidade.

4.2 Bagaço gerado na safra

Baseado na metodologia apresentada, segue os valores que estão mostrados na Tabela 11 para cada safra proposta, e foram calculados segundo as Equações 3 e 4. O Valor encontrado da moagem horária é constante em 133 toneladas por hora em função da moenda estar com uma velocidade constante de 408 t.h⁻¹, variando o valor na safra em função do bagaço que irá sobrar após a queima para a produção de vapor.

Tabela 11. Bagaço produzido para safras simuladas da usina

Bagaço [t]	Moagem [t]			
	1.000.000	1.200.000	1.400.000	1.600.000
Na safra	290.000	348.000	406.000	464.000

Fonte: Resolução das equações 5 e 6.

A quantidade de bagaço degradado por hora tem que ser suficiente para manter a caldeira alimentada com bagaço suficiente para manter a pressão e temperatura necessária ao processo e como é função da regulagem da velocidade da moenda, que foi considerada constante.

O aumento de produção de cana traz uma maior produção de bagaço e se o consumo energético da usina é constante, e queima uma quantidade de bagaço constante, independente da produção de cana, existirá a possibilidade de um volume de bagaço excedente maior e este poderá ser utilizado para a geração de energia elétrica na entressafra, conforme o estudo propõe.

4.3 Balanço de vapor e bagaço para uso na safra

São utilizadas 3 caldeiras de fabricação da CBC, modelo CBC VU80, com capacidade de 70 t/h de vapor superaquecido.

De acordo com o fluxograma apresentado no Apêndice 3, possui um reader de vapor de 21 kgf/cm² de pressão. É utilizada a capacidade máxima de geração de vapor, para onde convergem todo vapor gerado nas 3 caldeiras existentes. Após passar pelas turbinas das moendas, geradores e acionadores, é captado pelo reader de vapor de exaustão com 1,5 kgf/cm². Este vapor é utilizado para fabricação de açúcar nos evaporadores, no aquecimento da água de alimentação das caldeiras e na produção de álcool.

Para o cálculo do consumo de vapor [t.h⁻¹] e bagaço de processo [t.h⁻¹], Equação 10, foi considerada uma produção de vapor: 210 t.h⁻¹, que corresponde a capacidade nominal das 3 caldeiras, obtendo-se assim um Consumo de bagaço de 97,3 t.h⁻¹.

O consumo estimado de vapor [t.h⁻¹] e bagaço de processo [t.h⁻¹], baseados nos índices médios de caldeiras, da Equação 11, apresentou um consumo horário de vapor de 210,19 [t.h⁻¹] e um consumo de bagaço, cujo cálculo baseou-se na Equação 12, de 98 [t.h⁻¹].

A diferença encontrada entre o valor calculado e o valor estimado foi de 0,7%. O valor encontrado foi considerado aceitável, uma vez que não houve medição real de produção de vapor nas caldeiras e consumo nas turbinas, por instrumentos de leitura, que permitissem maior precisão para os valores calculados.

4.4 Bagaço para uso na entressafra

Baseado nos valores calculados, são apresentados os dados na Tabela 12. Contata-se que para cada moagem existe uma de sobra de bagaço para uso na entressafra constante de 3%. Com o aumento da moagem a produção de bagaço sofre aumento progressivo, porem com diminuição da produção. Com o aumento de produção de 1 milhão de toneladas para 1,2 milhões de toneladas de cana, há um incremento de 16,67% de disponibilidade de bagaço na entressafra, já com um aumento da produção de 1,2 para 1,4 milhões de toneladas de cana houve um acréscimo de 14,28 % e de 1,4 para 1,6 milhões de toneladas de cana tem-se um acréscimo de

12,50%. Isto ocorre devido ao aumento de perdas de bagaço na estocagem e a maior quantidade de torta de filtro produzida para cada situação.

Tabela 12. Produção, consumo e perdas de bagaço consideradas

Estimativas total do bagaço	Moagem na safra [t]			
	1.000.000	1.200.000	1.400.000	1.600.000
Bagaço total gerado na moagem	290.000	348.000	406.000	464.000
Bagaço total consumido na moagem	238.515	286.218	333.921	381.624,27
Bagaço reservado partidas	17.400	20.880	24.360	27.840
Bagaço consumido nos filtros	7.000	8.400	9.800	11.200
Bagaço para outro uso na entressafra	27.084,95	32.501	37.918	43.335,93
Perdas de bagaço considerada	812,55	975	1.137	1.300,08
Bagaço efetivo para uso na entressafra	26.272,41	31.527	36.781	42.035,85

Fonte: Item 4.2.11

Esta mesma premissa vale para o uso do bagaço para uso nas partidas das caldeiras durante a safra. Quanto menos partidas, menos é o consumo de bagaço. Vale salientar que as usinas ao longo dos anos desenvolveram estratégias de redução de paradas de manutenção durante a safra, a fim de maximizar o tempo de moagem.

4.5 Geração de energia elétrica para venda na entressafra

Baseado na premissa de que durante a entressafra a mão-de-obra, quando não é demitida, permanece na usina realizando outras atividades de apoio aos profissionais de manutenção, o custo de mão-de-obra não teria impacto significativo. Desta forma apenas o custo de combustível, seria um acréscimo ao sistema e seria abatido no saldo do ganho da venda de energia elétrica, conforme as considerações fixadas no projeto:

Consumo específico de vapor turbina de condensação: 8,00[Kgf/kWh]

Consumo de vapor para potência pretendida: $8 \times 3.000 = 24,00$ [tv/h]

Vazão do bagaço de retorno para alimentação da caldeira [t/h]

PCI do bagaço: 1.690 Kcal/kg (devido a estocagem aumenta a umidade)

Pela Equação 10: 11,78 [tb/h]

O tempo total de utilização do sistema para cada moagem está na Tabela 13, conforme Equação 16.

Tabela 13. Tempo de geração na entressafra.

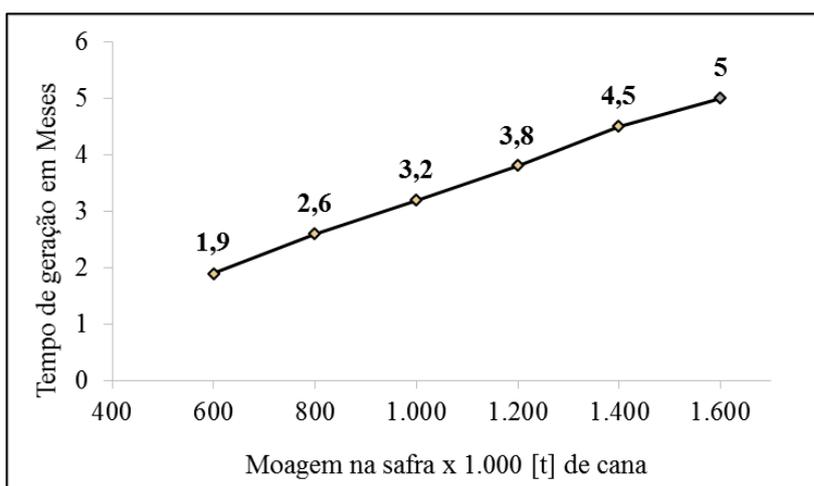
Tempo previsto de utilização	Moagem na safra [t]				
	800.000	1.000.000	1.200.000	1.400.000	1.600.000
Meses	2,6	3,2	3,8	4,5	5

Fonte: Equação 16.

4.6 Sobra de bagaço em função da moagem estimada

Para a análise de sobra de bagaço foram utilizadas as formulas da metodologia apresentadas no item 4 a partir de dados de produção de uma determinada safra, assim como a sobra de bagaço para entressafra e o tempo de utilização do sistema, para uma determinada potência produzida no gerador, e o consumo de bagaço na caldeira utilizada (Figura 13).

Figura 13. Tempo de geração de energia na entressafra em função da moagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

Para cada valor de produção de cana durante a safra, gerará uma quantidade de bagaço suficiente para gerar 2.200 kW durante um período de tempo, enquanto houver combustível. Sendo assim considerou-se que para montar uma estrutura de operadores de caldeiras, operadores de máquina para alimentação de bagaço no pátio e utilização efetiva da caldeira, só seria viável a partir de 3 meses de operação, a menos que o preço de venda de energia estiver muito favorável. Essa análise deverá ser feita pela usina a cada situação de safra e considerando a produção de bagaço e o preço de venda da energia no PLD.

4.7 Preço da energia

O preço da energia elétrica no mercado, à curto prazo, historicamente é muito variável, sendo difícil a determinação de um valor médio do PLD. Foi considerado então os preços médios anuais de 2016 de 2017. Considerado ainda, apenas o período útil de geração de energia elétrica na entressafra de abril a setembro, no Nordeste, é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14. Valor de venda PLD - Preço Liquidação das Diferenças para o Nordeste.

Mês	2016	2017	2018
	R\$ /MWh	R\$ /MWh	R\$ /MWh
Janeiro	310,38	139,25	178,01
Fevereiro	166,28	164,66	178,14
Março	249,11	284,01	218,14
Abril	266,71	372,41	108,64
Mai	106,07	418,20	211,57
Junho	118,60	143,59	441,96
Julho	108,68	280,81	505,18
Agosto	119,47	505,95	505,18
Setembro	149,02	521,83	472,75
Outubro	200,21	533,82	
Novembro	166,05	425,18	
Dezembro	122,19	234,20	
Média geral	173,56	335,33	
Media Abr-Set	144,76	373,80	

Fonte: CCEE, 2018. Preço médio PLD

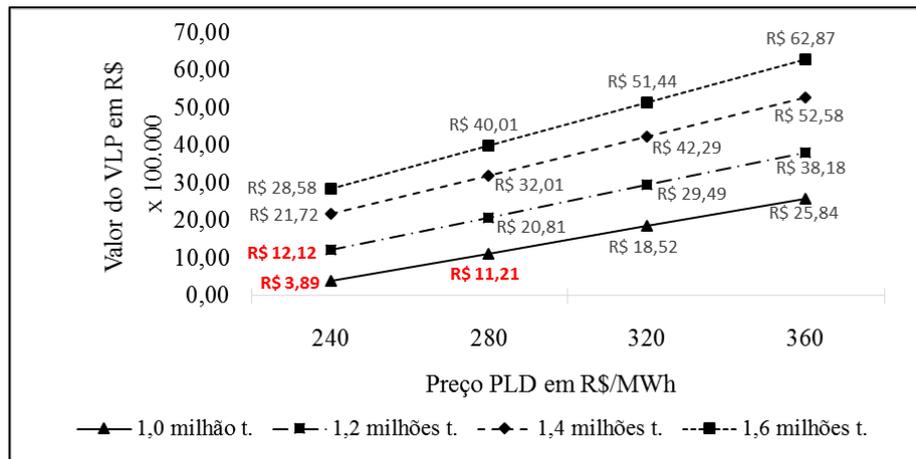
O preço médio geral 2016/2017 teve variação de preço de aproximadamente 52 %, e a previsão de receita com variação de preço nesta magnitude fica bastante complicada. O ano de 2018 tem mantido os preços abaixo de R\$ 212,00. Para os meses destacados de abril a setembro, entressafra na região Nordeste os preços foram vantajosos no ano de 2017, mas que não vem se mantendo em 2018. Com a média dos anos de 2016 a 2017 apenas para os meses de abril a setembro de R\$ 259,28.

4.8 Análises econômicas em função dos preços da energia

Análise do Valor Líquido Presente

O valor mínimo definido para que o projeto seja viável é de R\$ 1.500.000,00 e os resultados são apresentados na Figura 14. O resultado do investimento foi considerado inaceitável para uma safra de 1 milhão de toneladas e preço de venda de energia de 240 e 280 R\$/MWh, bem como para uma safra de 1,2 milhões de toneladas e preço de venda menores que 280 R\$/MWh. As demais situações foram consideradas aceitáveis.

Figura 14. – Valor Líquido Presente (VLP) para várias safras e preços de energia no Preço da Liquidação das Diferenças (PLD).



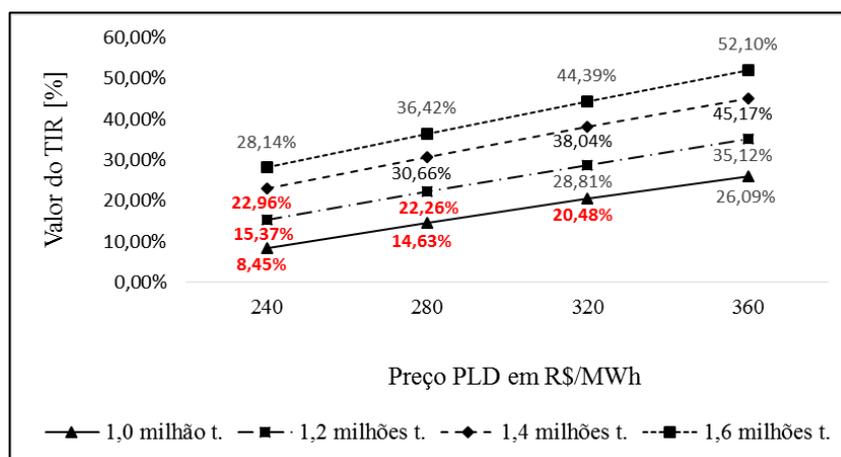
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

Cabe salientar que o valor do custo de capital foi estimado em 5% e considerando que a empresa poderá captar esse recurso através do BNDES que utiliza a Taxa de Longo Prazo (TLP) aplicando valores diferenciados de financiamento para empreendimentos de geração de energia. Caso ocorra a partir do ano de 2019 um aumento de consumo de energia no Brasil e a matriz energética não tiver capacidade de suprir a demanda, certamente deverão ser abertas linhas de crédito para estes investimentos, podendo alavancar a proposição do trabalho.

Análise da Taxa Interna de Retorno

O valor mínimo foi definido em 25%. A Figura 15 apresenta os resultados e destaca os valores que não atendem ao critério estabelecido nas simulações.

Figura 15. – Taxa Interna de Retorno (TIR) para várias safras e preços de energia no Preço da Liquidação das Diferenças (PLD).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

O resultado mostra que o investimento foi considerado inaceitável para a safra de 1 milhão de toneladas e a venda de energia no PLD menores ou iguais a 320 R\$/MWh, e para a safra de 1,2 milhões de toneladas e preços menores ou iguais a 320 R\$/MWh, sendo que as demais situações foram consideradas aceitáveis.

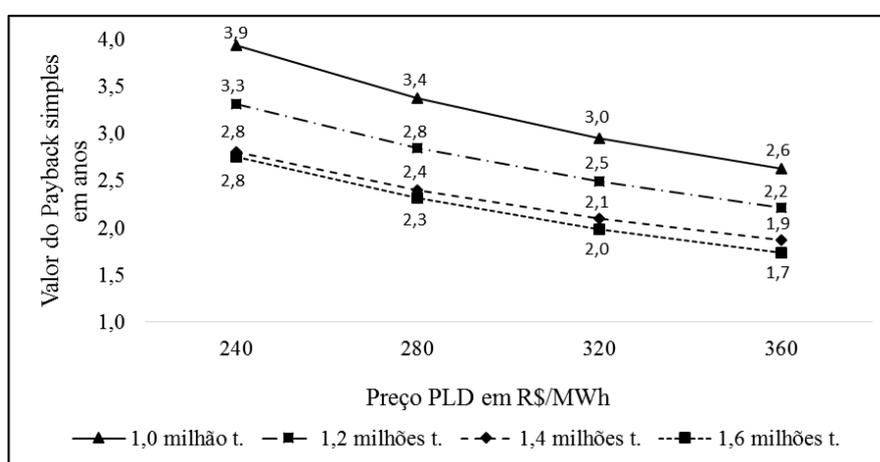
Este resultado indica que, mesmo para safras iguais ou superiores a 1 milhão de toneladas, seja definido que haveria um retorno em 4 anos, esse resultado pode ser flexibilizado caso a empresa decida aumentar ou diminuir o prazo de retorno pretendido.

Como o valor da energia elétrica tem variado enormemente no período proposto de entressafra (Baseado nos anos de 2016 a 2018), poderá haver ajustes que permitam considerar a utilização do sistema de geração na entressafra mesmo para retornos inferiores a 25%, desde que no ano anterior o valor tenha sido mais satisfatório em termos de lucratividade.

Payback Simples

O tempo mínimo considerado para o retorno do investimento foi de 4 anos para o retorno do investimento. Como este valor não exprime com exatidão o tempo de retorno, por não considerar o valor do dinheiro ao longo do tempo, não é o melhor indicativo para análise, mas indica se o investimento terá o retorno financeiro esperado. A Figura 16, apresenta os resultados calculados.

Figura 16. Payback simples para várias safras e preços de energia segundo o Preço da Liquidação das Diferenças (PLD).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

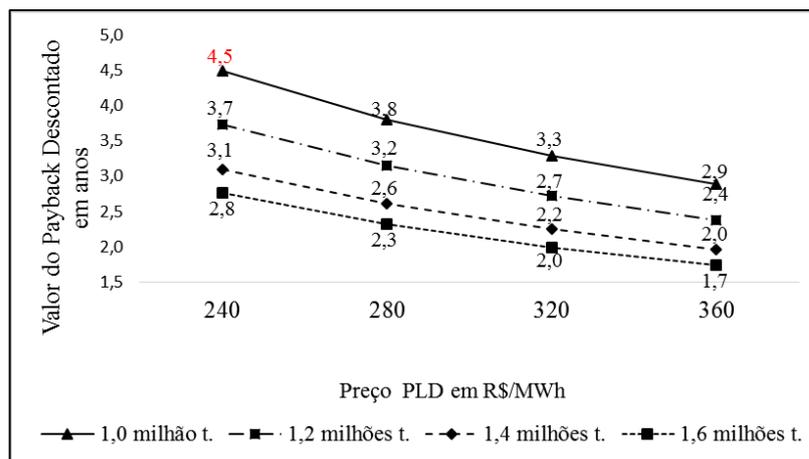
Todos as simulações atendem ao critério estabelecido. O resultado obtido compreende um retorno entre 2 a 4 anos. Vale ressaltar que este tempo de retorno foi calculado para valores

de venda de energia entre 240 e 360 R\$/MWh e caso ocorra anos com valores acima do fixado, o período de retorno diminui, melhorando ainda mais o resultado obtido.

Análise do Payback Descontado

O valor mínimo considerado também foi de 4 anos, e a Figura 17 apresenta os resultados e destaca os valores que não atendem ao critério estabelecido nas simulações. Esta simulação é mais precisa que a anterior, pois levar em consideração o valor do dinheiro no tempo.

Figura 17. Payback descontado para várias safras e preços de energia segundo o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

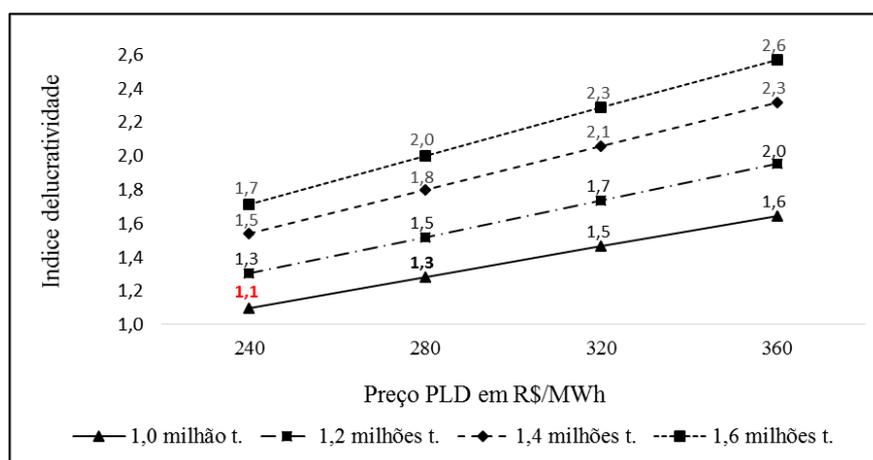
Apenas para uma safra de 1 milhão de toneladas e preço de energia abaixo de 280 R\$/MWh não atende ao critério estabelecido. O resultado obtido foi estipulado para um tempo de retorno entre 2 a 4 anos.

Da mesma forma que no payback simples, o tempo de retorno foi calculado para valores de venda de energia entre 240 e 360 R\$/MWh, e caso ocorra anos com valores acima do fixado, o período de retorno será diminuído, afim de viabilizar todos os valores em 4 anos.

Análise do Índice de Lucratividade

Valor mínimo definido de 25%, mostrado na Figura 18, e nela são destacados os resultados e destaca o valor que não atende ao critério estabelecido nas simulações.

Figura 18. Índice de Lucratividade para várias safras e preços de energia no PLD – Preço de Liquidação das Diferenças.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O resultado de safras menores de 1,0 milhão de toneladas e preço da energia abaixo de 240,00 R\$/MWh e safra de 1,0 milhão de toneladas não atendem ao critério estabelecido, os demais são aceitos.

Resumo da análise econômica

Para melhor entendimento dos resultados econômicos deve-se observar conjuntamente todos os resultados e avaliar o conjunto de rejeições para cada situação de produção e preço de energia, conforme tabulado no Quadro 1.

Fica demonstrado que somente acima de 1,6 milhões de toneladas, mesmo com valores menores de remuneração da energia vendida (240 R\$/MWh) existe segurança de retorno do investimento em 4 anos, conforme premissa estabelecida, pelo valor de escala uma maior produção de energia no período. Usinas como produção de cana com safras superiores a 2 milhões de toneladas, como as já citadas Caeté, Coruripe e Santo Antônio, tem esse perfil e por este motivo são detentoras da maior quantidade de energia vendida no estado de Alagoas.

Usinas que não possuem este nível de produção tem, portanto que efetuar exercícios de viabilidade de seus investimentos em geração de energia, com maior acuidade, pois o risco de não atingir o resultado esperado é grande, para um investimento alto necessário.

Quadro 1. Valores aceitáveis da análise econômica

Moagem [t] X 1.000	Valor de venda da Energia no PLD [R\$/MWh]			
	240	280	320	360
1.000	Rejeitado VLP-TIR PBC-IL	Rejeitado VLP –TIR	Rejeitado TIR	Aprovado
1.200	Rejeitado VLP-TIR	Rejeitado TIR	Aprovado	Aprovado
1.400	Rejeitado TIR	Aprovado	Aprovado	Aprovado
1.600	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

O valor da Taxa Interna de Retorno (TIR) que foi fixada em 25% foi a que se mostrou com fator de rejeição mais contundente, pois limitou o retorno do investimento para 37,5 % dos 16 casos apresentados.

O Valor Líquido presente, fixado em R\$ 1.500.000,00 e o índice de lucratividade de 25%, se apresentaram como segunda causa de rejeição com 18,8% dos 16 casos apresentados.

O Payback composto, fixado em 4 anos para o retorno do investimento teve 6,3% dos 16 casos apresentados.

A utilização do modelo proposto pelo estudo, para a tomada de decisão de investimento, deve ser feita através de um acompanhamento constante dos preços da energia no mercado.

É aconselhável a contratação de uma dessas empresas que possuem expertise na compra e venda de energia, a fim de assessoramento de compradores, e comercialização da energia excedente, para que se atinja valores de lucratividade pretendidos.

5. CONCLUSÕES

A geração de energia elétrica só é viável para uma moagem de 1 milhão de toneladas de cana quando o valor da energia elétrica for maior que R\$ 360,00 R\$/MWh.

Para uma moagem de 1 milhão de toneladas, o preço mínimo que retorna o investimento em 4 anos requer um preço mínimo de energia de 360 R\$/MWh;

Para uma moagem de 1,2 milhões de toneladas, o preço mínimo que retorna o investimento em 4 anos requer um preço mínimo de energia de 320 R\$/MWh;

Para uma moagem de 1,4 milhões de toneladas, o preço mínimo que retorna o investimento em 4 anos requer um preço mínimo de energia de 280 R\$/MWh;

Para uma moagem de 1,6 milhões de toneladas, o preço mínimo que retorna o investimento em 4 anos requer um preço mínimo de energia de 240 R\$/MWh.

Este estudo concluiu que existe uma potencial possibilidade de geração de energia na entressafra, sendo uma alternativa de faturamento que, somado a produção de açúcar e etanol, poderá ajudar na recuperação financeira da usina, desde que os preços de venda no mercado de energia elétrica sejam vantajosos no período da entressafra, quando existe a possibilidade de venda.

Certamente outras oportunidades de melhoria poderão aparecer em estudos futuros, que garantam a continuidade operacional de um setor que traz renda e muitos empregos para o Estado de Alagoas.

6. LITERATURA CITADA

ANELL, Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Resultado da audiência Pública AP 67/2016, realizada para colher subsídios as propostas de alteração nas regras de comercialização de energia elétrica** – Versão 2017.1.0 Nota Técnica nº 281/2016-SEM/ANEEL. Processo 48500.004717/2015-19. Dezembro 2016.

ANELL, Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Regulação do Mercado de Energia Elétrica – Comercialização**. Página inicial. Disponível em:<[http://aneel.gov.br/mercado-de-eletricidade.Resolucao normativa 2014](http://aneel.gov.br/mercado-de-eletricidade.Resolucao%20normativa%202014)>. Acessado em maio 2017.

ALCARDE. A. Ricardo. **Processamento da Cana de Açúcar**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2015.Disponívelem: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_102_22122006154841.html> Acesso em 03/08/2018.

BEAL: **Balço Energético do Estado de Alagoas 2015. Ano Base 2014**.Secretaria de Estado do Planejamento e do Desenvolvimento Econômico de Alagoas. Disponível em: <http://dados.al.gov.br/dataset/balanco-energetico-do-estado-de-alagoas> >. Acessado em março 2017.

BRUNELLI, Sidnei. **Recepção, alimentação, preparo e moagem de cana - Um setor maduro**. Revista Opiniões sobre o setor Sucroenergético, n. 27, p 30, jan-mar.2011.

CAMAGO, C.A. de; USHIMA, A.H.; RIBEIRO, A de M. de M; SOUZA, M. E. de P.; SANTOS; N. F. dos. **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool**. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas,1990.

CARVALHO, C. P. O. **Novas Estratégias Competitivas para o Novo Ambiente Institucional: O Caso do setor Sucro-Alcooleiro de Alagoas 1990/2001**. Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 32, n. Especial p. 654-675, novembro 2001.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. A. **Considerações sobre a Ampliação da Geração Complementar ao Parque Hídrico Brasileiro**. GESEL-UFRJ. Rio de Janeiro, janeiro de 2010, Texto de discussão do setor elétrico, TDSE nº 15.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; HUBNER, N.; DANTAS, G.; ROSENTHAL, R. **A formação do preço da energia elétrica: Experiências internacionais e o modelo brasileiro**. GESEL-UFRJ. Rio de Janeiro, novembro de 2014, Texto de discussão do setor elétrico, TDSE nº 62.

CCEE: Câmara de Comercialização de Energia **Leilões de energia elétrica**. Informações ao mercado. Disponível em: < https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado> Acesso: 12 jan.2018.

CCEE: Câmara de Comercialização de Energia **Preços médios PLD**. Informações ao mercado. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios> Acessos: outubro 2016 a março 2018.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quinto levantamento, fevereiro de 2011**. Brasília, 2011. 39p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra Brasileira-Cana-de-açúcar**. V. 5 - SAFRA 2018/19 N.1 - Primeiro levantamento. Maio 2018.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Fórum de Meio Ambiente do Setor Elétrico. Diversificação e diferenciais sustentáveis da matriz elétrica brasileira**. Confederação Nacional da Indústria. – Brasília: CNI, 2012.63 p. (Cadernos setoriais Rio+20)

COELHO, S. T. **Mecanismo para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa: um modelo para o Estado de São Paulo**. 1999. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo.

CORRÊA NETO, V.; RAMON, Dan. **Análise de opções tecnológicas para projetos de cogeração no setor sucroalcooleiro**. Brasília, DF: Sustainable Energy Technology, maio,2002.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMES, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas. Editora da UNICAMP,2008.

CRUZ, A. C dos S; INÁCIO, R. A. C.; MORAES, R. **A crise no setor sucroenergético e as empresas do município de Sertãozinho-SP.** Revista eletrônica “diálogos acadêmicos”. V. 5, Nº2, p.114-127, Julho - Dezembro 2003. ISSN:0486-6266.

CTC – Centro De Tecnologia Copersucar. **Curso de operação de moendas.** Seção de Tecnologia de Moagem. 1999.

DCAA-Declaração de Conformidade de Atividade Agropecuária; SPAE-Secretaria Produção e Agroenergia; MAPA-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Produção Brasileira de cana-de-açúcar, açúcar e etanol.** Atualizado em Jun,2018.

ELEKTRO. **Eficiência energética: Fundamentos e aplicações.** Universidade Federal de Itajubá. Excen. Fupai. Campinas – SP.2012.

EXCÊLENCIA ENERGÉTICA, Excelência Energética Consultoria Empresarial Ltda. **Barreiras regulatórias para comercialização de eletricidade por usinas sucroalcooleiras.** Relatório técnico. CNPEN-Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, Maio2017.

FLÔRES JUNIOR, R. G. F. (Coordenador). **Análise da matriz energética e da promoção da energia renovável no setor elétrico brasileiro.** FGV NPII. Rio de Janeiro.2016.

GALBIATI, J. K.; GALLO, C. A., LAVANHOLI, M. G. D. P. **Produção de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar.** Revista Nucleus, V.7.n.1.abril 2010. ISSUE DOI: 10.3738/1982.2278-319

GARCIA, J. R.; LIMA, D. A. L. L; VIEIRA, A. C. P. **A nova configuração da estrutura produtiva do setor sucroenergético brasileiro: Panorama e perspectivas.** Revista de Economia Contemporânea (2015) 19(1): p. 162-184(Journal of Contemporary Economics).

HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira.** São Paulo: Editora Mestre Jou.1977.

INDUSTRIA ENERGIA. Diversificação e **diferenciais sustentáveis da matriz elétrica brasileira.** Confederação Nacional da Indústria. Fórum de Meio Ambiente do Setor Elétrico. – Brasília: CNI, 2012.

LIMA, Araken A. **A agroindústria canavieira alagoana: da criação do IAA a desregulamentação na década de 1990**. Campinas: Instituto de Economia/UNICAMP, 2001. (Dissertação de Mestrado).

LOPES, C. H. (Organizador). **Tecnologia de produção de açúcar de cana**. Coleção UAB-UF São Carlos.SP.2011.183p.

LOUREIRO, Osman. **Açúcar, notas e comentários**. Associação dos Produtores de Açúcar do Estado de Alagoas – ASPLANA. Maceió, s.n. 1970.

MARINO, E. **Visão atualizada sobre produção de vapor em usinas e destilarias**. STAB ,14º SBA-A Usina da superação.30/10/2013. Disponível em:<
http://www.stab.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=65&Itemid=77.
Acessado em 8 de jan. 2018.

MEDEIROS, S. R. de; GOMES, R.C.; BUNGENSTAB, D. J., **Nutrição de gado bovino, fundamentos e aplicações**. Embrapa, Brasília, 2015. ISBN: 978-85-7035-419-8

MME. Ministério de Minas e Energia. **Capacidade instalada de geração elétrica Brasil e Mundo (2016)**. Departamento de informações e estudos energéticos DIE/SPE/MME. Edição Maio 2017.

MONTEIRO, T. P. P.; FERREIRA, P. A. **Gestão e meio ambiente: Um Estudo de caso em uma usina sucroalcooleira**. SOBER - Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Campo Grande, 25 a 28 de julho de 2010,

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G. **A Dimensão do Setor Sucoenergético- Mapeamento e Quantificação da Safra 2013/14**. Fundace – Fundação para Pesquisa e Desenvolvimento da Administração, Contabilidade e Economia. FEA-RP/USP – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto.2014.

PEREIRA, D. A.S; ARRUDA G. M, AZEVEDO, B. G. A.; ARAUJO, R.S.; REIS, R. A. Estudo de viabilidade de investimento em uma indústria de confecções: Utilização das técnicas VPL, TIR, Payback Descontado e Índice de Lucratividade. IV Congresso de Administração do Sul de Mato Grosso. CONASUM 2016. Universidade Federal de Mato Grosso. 13 a 15 dezembro 2016.

PERES, N. P. **Eficiência em caldeiras na agroindústria canavieira**. São Paulo: STAB – Sociedade dos técnicos açucareiros e alcooleiros do Brasil, 1982. Apostila

SANTOS, F. A. dos. **Análise de aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: Usina de açúcar, etanol e bioeletricidade**. São Paulo, 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas

SEPLAN-AL. Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio. **Diversificação Produtiva como Alternativa para a área Canavieira de Alagoas**. Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio. – Alagoas, Maceió: SEPLAG, 2017. 29p.

SILVA, A. B.; AMARAL, A. J. do; SANTOS, J. C. P dos; GOMES, E. C.; MARQUES, F. A.; NETO, M. B. de O. **Potencial pedológico do Estado de Alagoas para o cultivo de cana-de-açúcar em manejo com alta tecnologia**. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 28 de julho a 2 de agosto de 2013. Costão do Santinho Resort. Florianópolis. Santa Catarina.

SILVA, C. R. P. da. **Apostila de turbinas**. SENAI. Trabalho editorado pela Escola SENAI Hessel Horácio Cherkassky. Departamento Regional de São Paulo. 2005

SINDAÇÚCAR-AL. **Área canavieira**. Disponível em: <[Http://www.sindacucar-al.com.br/area-canavieira](http://www.sindacucar-al.com.br/area-canavieira)>. Acesso em: 13 de ago. 2018.

SILVA, M. B. da; MORAIS, A. dos S. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação**, XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 13 a 16 outubro de 2008.

SINDAÇÚCAR-AL. **Boletim da safra semanal.** Disponível em:<[Http://www.sindacucar-al.com.br/periodo/semanal](http://www.sindacucar-al.com.br/periodo/semanal)>. Acesso em: 20 de abr.2018.

SINDAÇÚCAR-AL. **Dados estatísticos.** Disponível em:<[Http://www.sindacucar-al.com.br/dados-estatisticos](http://www.sindacucar-al.com.br/dados-estatisticos)>. Acesso em: 13 de dez.2017.

SZMERCSÁNYI, T. **O Planejamento da agroindústria canavieira no Brasil (1930 75).** São Paulo: Hucitec, 1979.540p.

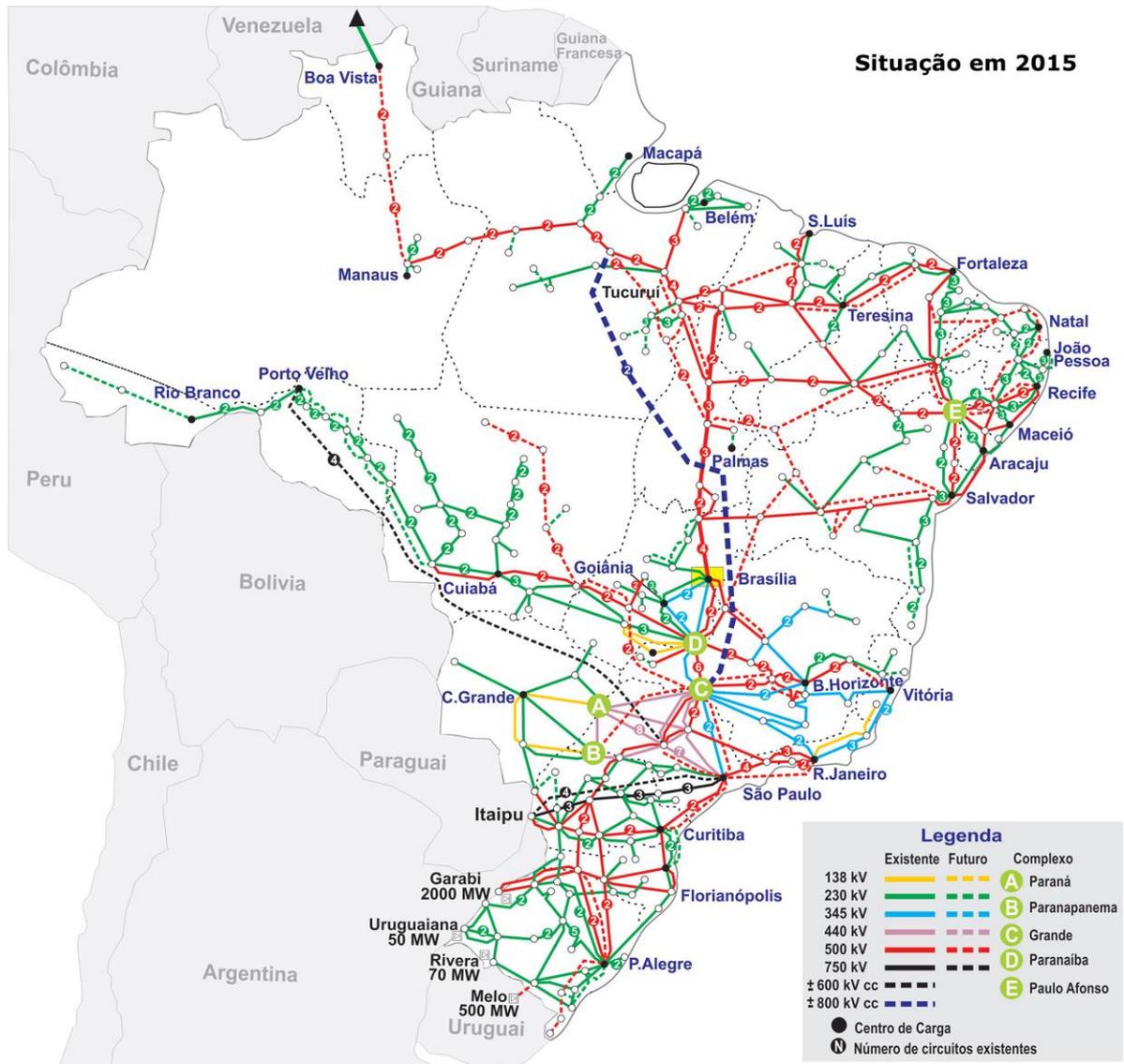
TENÓRIO, D. A. **Caminhos do açúcar engenhos e casas-grandes de Alagoas.** Instituto geográfico Brasileiro. Ano 2009.

ÚNICA.UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Produção de cana-de-açúcar do Brasil.** Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica>>. Acesso em: jan 2018.

WEG – **Manual de Características e Especificações de Geradores.** Jaraguá: WEG, 2017. Linha G i-Plus e AG10 4 p.

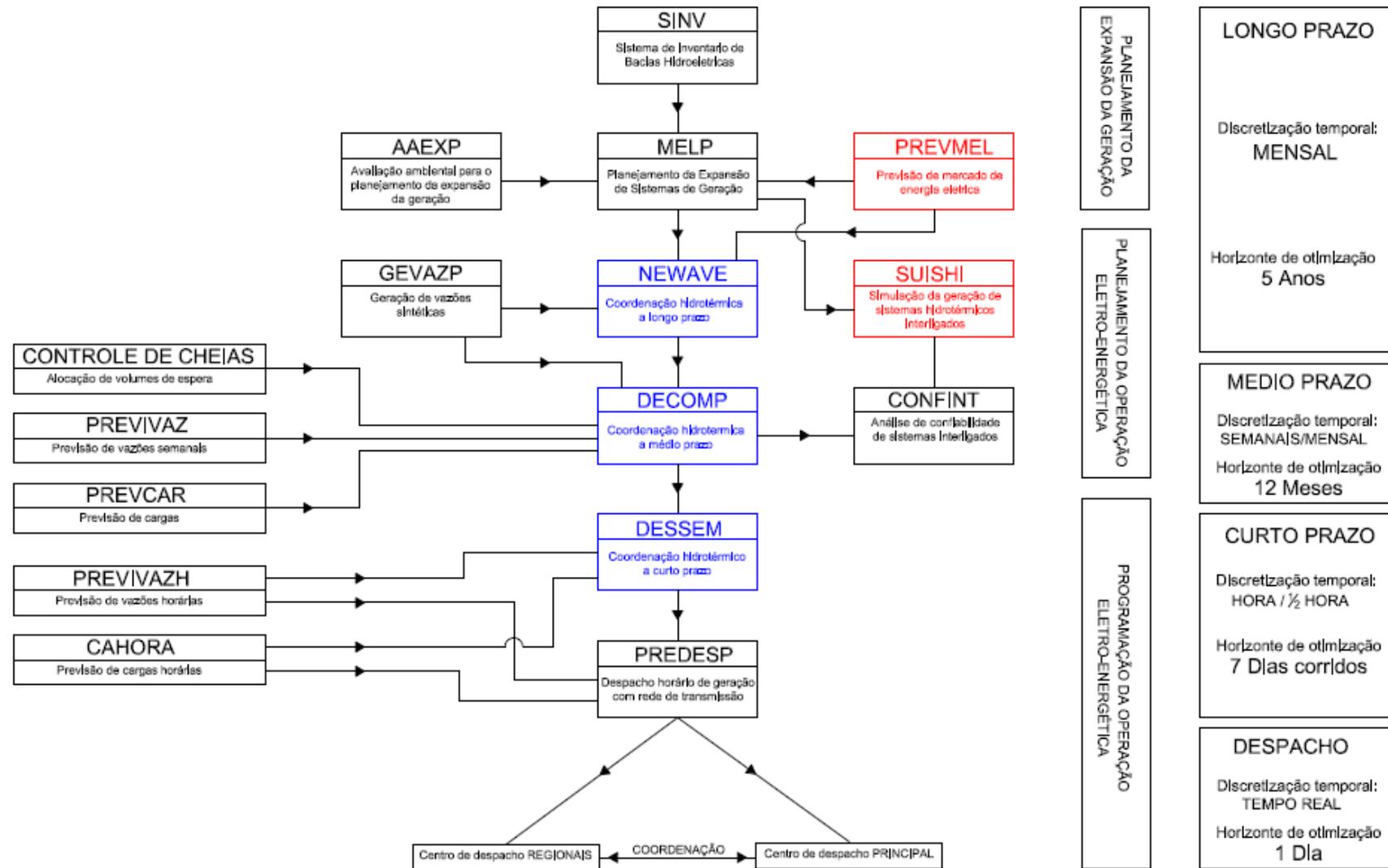
VIDAL, M. de F. **Setor sucroenergético nordestino.** Caderno setorial ETENE. Ano 3.Número 25. Fevereiro 2018.

Apêndice 1. Sistema interligado de distribuição de energia elétrica



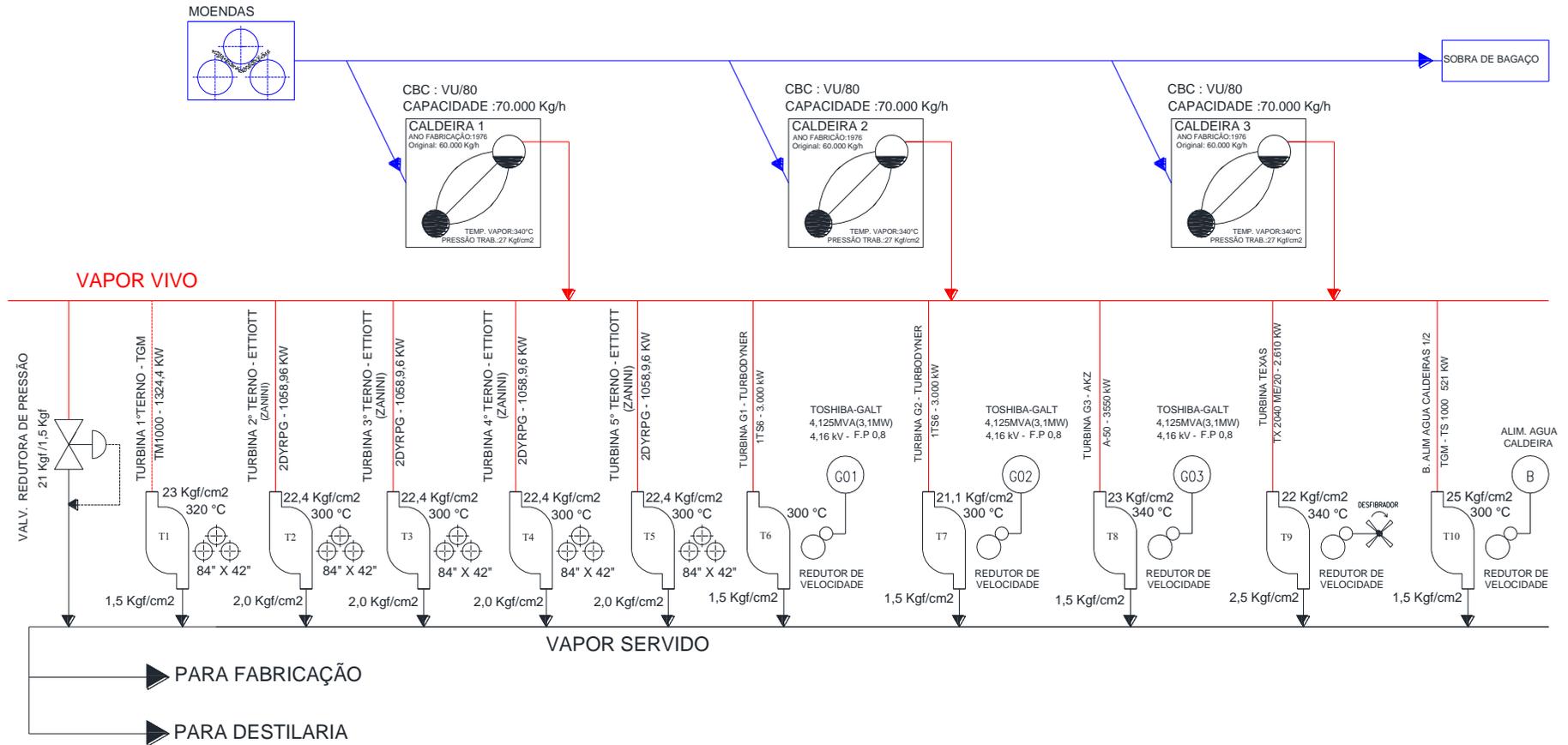
Fonte: ANEEL, 2018.

Apêndice2. Controle de planejamento do sistema elétrico



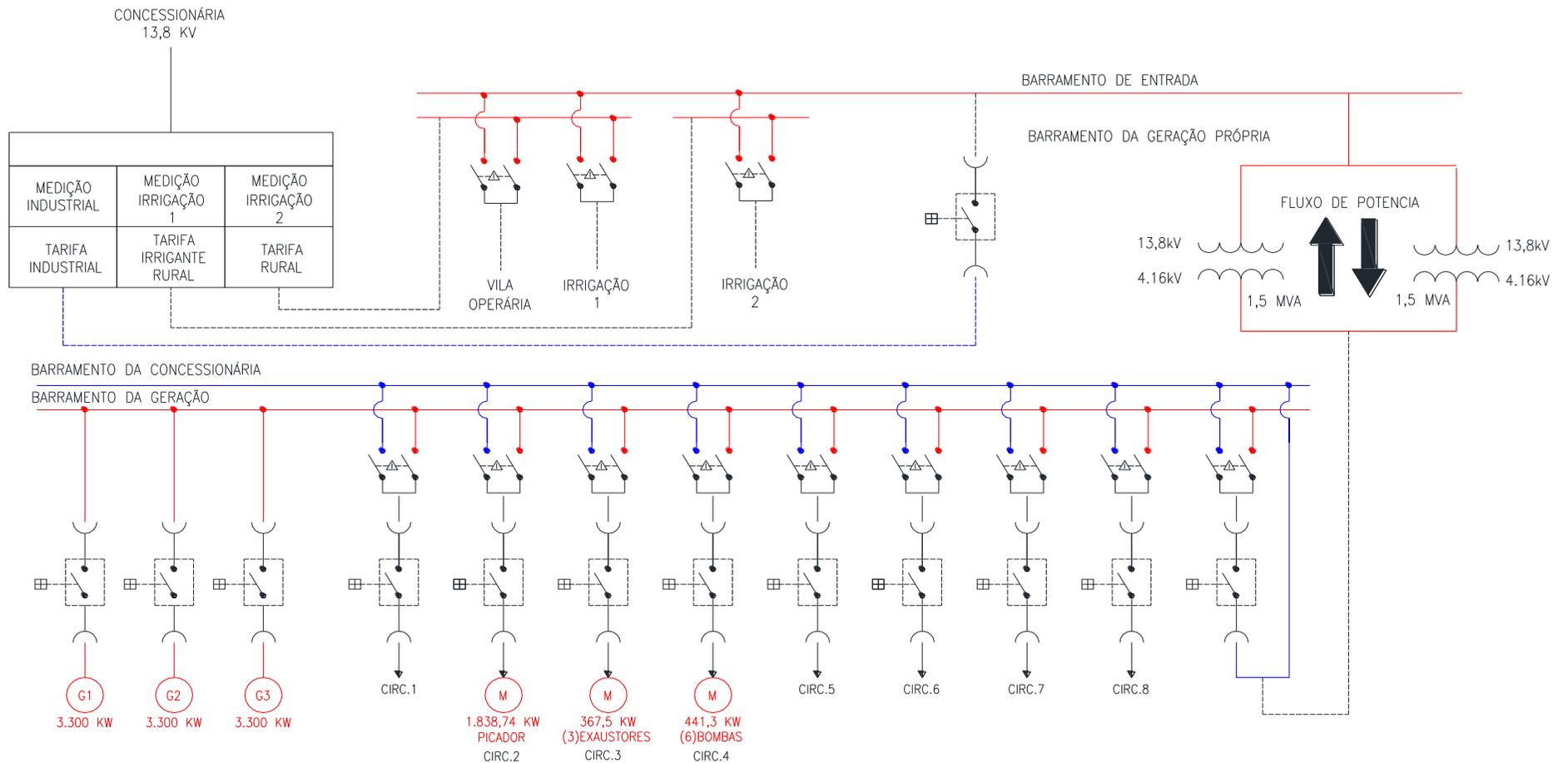
FONTE: Elaborado pelo autor, 2018.

Apêndice3. Fluxograma de vapor da usina Utinga Leão



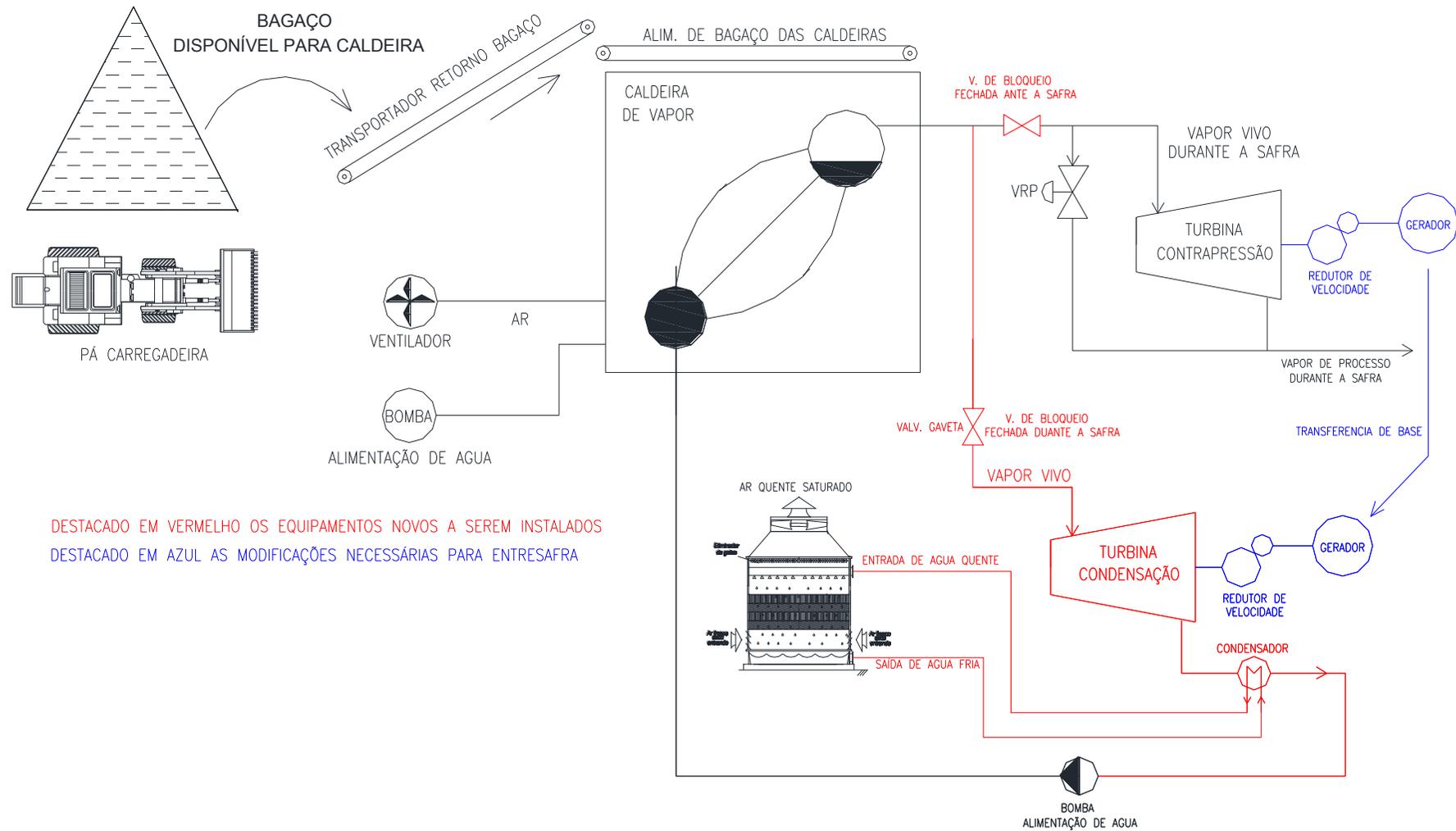
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Apêndice 4. Diagrama unifilar elétrico simplificado da usina Utinga Leão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018

Apêndice 5. Esquema de geração de energia elétrica proposto para entressafra



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018