

ÉDER RENATO SAVAZZI

**SUSTENTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA PLANTA
INDUSTRIAL UTILIZANDO A TECNOLOGIA DE REGENERAÇÃO**

Guaratinguetá

2017

ÉDER RENATO SAVAZZI

**SUSTENTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA PLANTA
INDUSTRIAL UTILIZANDO A TECNOLOGIA DE REGENERAÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Guaratinguetá

2017

S266s	Savazzi, Éder Renato Sustentabilidade e otimização energética de uma planta industrial utilizando a tecnologia de regeneração. / Éder Renato Savazzi – Guaratinguetá, 2017. 107 f : il. Bibliografia: f. 101-107 Dissertação Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho 1. Energia - Fontes alternativas 2. Energia elétrica - Conservação 3. Biocombustíveis 4. Sustentabilidade I. Título CDU 620.91(043)
-------	--

EDER RENATO SAVAZZI

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP-FEG


Prof. Dr. PAULO ARMANDO PANUNZIO
UNISAL

Agosto de 2017

DADOS CURRICULARES

ÉDER RENATO SAVAZZI

NASCIMENTO	09.06.1979 – ARARAS / SP
FILIAÇÃO	Octavio Savazzi Helena Manoel Savazzi
1994 – 1997	Curso Técnico em Eletrotécnica Colégio Técnico Paula Souza de Araras - CEETEPS
1999 – 2004	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Faculdade Einstein de Limeira
2009 – 2010	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Sucroalcooleira Nível de Especialização FEQ - Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
2016 – 2017	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Nível de Mestrado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP

à Adriana e ao Matheus pela sorte de tê-los ao meu lado

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, por ter me concedido uma alma simples, por ter permitido que eu chegasse até aqui e por ter percorrido todo o caminho ao meu lado.

À minha esposa Adriana e ao meu filho Matheus, pelo apoio, pelo incentivo e, sobretudo, pela paciência de todos os dias.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pela dedicação de toda uma vida e por todas as oportunidades a mim proporcionadas.

Ao Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho, meu orientador, por ter me aberto suas portas, pela confiança e pelo trabalho de orientação realizado com dedicação, paciência e companheirismo.

À empresa Mause, pelo aprendizado e informações disponibilizadas.

À empresa GE, pela oportunidade concedida e pelo incentivo para a conclusão desta pesquisa.

À FEG/UNESP, minha *alma mater*.

Conhece-te a ti mesmo, torna-te consciente de tua ignorância e serás sábio.

Sócrates

Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, eles são a abertura para achar as que estão certas.

Carl Sagan

SAVAZZI, E. R. **Sustentabilidade e Otimização Energética de uma planta industrial utilizando a tecnologia de regeneração**. 2017. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

O emprego de centrífugas tipo batelada numa usina sucroalcooleira é feito a partir de dados disponibilizados pelos fabricantes dos equipamentos, em função, basicamente, da capacidade produtiva de cada máquina e da sua eficiência energética. Grande parte das unidades sucroalcooleiras em atividade no país ainda operam com máquinas antigas, de pequeno porte, com baixa eficiência energética, com acionamento por motores multi-polos comandados por contadores para variação da velocidade. Até a década passada as usinas produtoras de açúcar e etanol geravam energia apenas o suficiente para seu auto consumo; com os incentivos do governo federal através de programas como o Proinfa, as usinas foram motivadas a comercializar seu excedente de energia para o SIN, possibilitando o aumento de suas receitas. Pelo fato de produzir sua própria energia através da queima do bagaço, praticamente não havia preocupação com os equipamentos de baixa eficiência energética que operavam nestas plantas, porém, a partir da possibilidade da comercialização do excedente de energia foi necessário um trabalho para melhorar o desempenho energético dos equipamentos de maior consumo. Deste modo, a proposta deste trabalho consiste na análise comparativa da substituição de centrífugas antigas por centrífugas modernas (considerando o dimensionamento adequado em função do processo e dos limites operacionais de cada máquina), com foco tanto nos resultados técnicos, quanto produtivos e financeiros do investimento. As centrífugas propostas possuem motor de alto rendimento acionados por inversor de frequência regenerativo, que possibilita a geração de energia pela própria máquina durante a etapa de desaceleração e, como se trata de um processo cíclico, a devolução de energia para a rede é feita repetidamente a cada ciclo. O modelo de otimização proposto foi validado a partir de dados de aplicações em empreendimentos existentes, com resultados compatíveis com o que foi efetivamente implantado; seu pay-back tem a capacidade de pagar a implantação de uma nova máquina por ano, apenas com o retorno financeiro do ganho com energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Energética; Bioenergia; Sustentabilidade; Etanol; Energia; Biomassa; Açúcar; Centrifugação;

SAVAZZI, E. R. **Sustainability and Energy Optimization of an industrial plant, using the regeneration technology.** 2017. 107 f. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

The use of batch centrifuges in a sugar mills is based on data provided by the equipment manufacturers, basically due to the production capacity of each machine and its energy efficiency. Most of the sugar-alcohol units in operation in the country still operate with old machines, small, with low energy efficiency, driven by multi-pole motors driven by contactors for speed variation. Until the past decade, sugar and ethanol-only plants that produced only enough energy for their own consumption, with the federal government's incentives through programs like Proinfa, the mills were motivated to market their surplus energy to SIN. Thus enabling an increase in its revenue. Because it produced its own energy through the burning of the bagasse, there was practically no concern with the low energy efficiency equipment that operated in these plants, from the possibility of the commercialization of surplus energy, a work was needed to improve the energy performance of the equipment Consumption. Thus, the proposal of this work consists of the comparative analysis of the replacement of old centrifuges by modern centrifuges (considering the adequate design depending on the process and the operational limits of each machine), focusing both on technical and productive and financial investment results. The proposed centrifuges have high efficiency motor driven by a regenerative frequency inverter, which allows the generation of energy by the machine itself during the deceleration stage and as it is a cyclic process the return of energy to the network is done repeatedly every cycle. The proposed optimization model was validated from application data in existing projects, with results compatible with what was effectively implemented, the pay-back has ability to pay for the deployment of a new machine per year, only with the financial return of the gain in electric power.

KEYWORDS: Energy Efficiency; bioenergy; Sustainability; Ethanol; Energy; biomass; Sugar; centrifugation;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte [%].....	20
Figura 2 – Excedente versus Déficit.....	28
Figura 3 – Usina Sucroalcooleira Vertente, município de Guaraci-SP.	32
Figura 4 – Potencial produtivo para o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil – Sem irrigação. .	33
Figura 5 – Usinas Sucroalcooleiras em operação no Brasil.	34
Figura 6 – Caracterização do processo de produção da fase industrial de uma usina sucroalcooleira.....	35
Figura 7 – Exemplo de composição de uma variedade de cana.	36
Figura 8 – Recepção e preparo da cana.	37
Figura 9 – Moagem da cana.	38
Figura 10 – Extração por difusor - Processo de Lixiviação e Difusão	39
Figura 11 – Extração por difusor - Processo de Secagem do bagaço.....	39
Figura 12 – Processo produtivo do açúcar.....	40
Figura 13 – Tratamento do caldo – Sulfitação e Calagem.	41
Figura 14 – Tratamento do caldo – Aquecimento.	42
Figura 15 – Tratamento do caldo – Decantação e Peneiramento Estático.	43
Figura 16 - Evaporadores – Múltiplo Efeito.....	44
Figura 17 – Cozedores.....	45
Figura 18 – Cristalizadores.....	45
Figura 19 – Centrifugação.....	46
Figura 20 - Diagrama esquemático de uma centrifuga de batelada.....	48
Figura 21 – Secagem, Armazenamento e Carregamento de Açúcar.	49
Figura 22 – Ilustração do processo de fabricação, açúcar, etanol e energia elétrica.	51
Figura 23 – Bagaço oriundo da moagem da cana para envio as caldeiras.	51
Figura 24 – Setor de caldeiras, onde o bagaço oriundo é queimado para geração de vapor.	54
Figura 25 – Setor de Geração de Energia Elétrica.....	54
Figura 26 – Fluxo de Energia de uma Central Térmica de Cogeração de uma usina sucroalcooleira.....	55
Figura 27 – Ganho energético com o aumento da pressão e da temperatura do vapor.	57
Figura 28 – Relação entre eficiência energética e pressão-temperatura em caldeiras a vapor.	58
Figura 29 – Conjunto turbina gerador.	58

Figura 30 – Turbina a Vapor da linha A200, até 220MW.....	59
Figura 31 – Gerador Síncrono da linha TOPACK, até 120MVA em 60Hz.....	59
Figura 32 – Terno de Moenda da linha MCD/01, até 1.400 TCH, 7 RPM.	60
Figura 33 – Terno de Moenda com acionamento a vapor.	61
Figura 34 – Tandén de Moenda da linha MCD/01, com acionamento eletro-hidráulico.	61
Figura 35 – Ciclo típico de uma centrífuga de batelada para fabricação de açúcar.	64
Figura 36 – Motor multi-pólos de 150kW/380V - 4/6/12/24 Pólos,.....	65
Figura 37 – Instalação típica de centrífugas de batelada tipo V1000.....	65
Figura 38 – Ciclo típico de uma centrífuga de batelada com inversor regenerativo.....	66
Figura 39 – Instalação típica de centrífugas de batelada tipo MAC1800MII.	67
Figura 40 – Detalhes construtivos de uma centrífuga de batelada.	68
Figura 41 – Triângulos das Potências.....	74
Figura 42 – Fluxo de Direção das Potências nos Quatro-Quadrantes.	75
Figura 43 – Ciclo típico de uma centrífuga de batelada para fabricação de açúcar.	83
Figura 44 – Detalhes e comportamento típico de uma centrífuga de batelada acionada por motores multi pólos.	84
Figura 45 – Potência de uma centrífuga de batelada acionada por motores multi pólos.	85
Figura 46 – Potência de duas centrífugas de batelada acionadas por motores multi pólos.....	86
Figura 47 – Potência de 3 centrífugas de batelada acionadas por motores multi pólos.	87
Figura 48 – Potência de 4 centrífugas de batelada acionadas por motores multi pólos.	87
Figura 49 – Detalhes e comportamento típico de uma centrífuga de batelada acionada por motor de indução e inversor regenerativo.	88
Figura 50 - Potência de uma centrífuga de batelada acionada por motor de indução e inversor regenerativo.	89
Figura 51 – Potência de duas centrífugas de batelada acionadas por motores de indução e inversores regenerativos.	90
Figura 52 – Potência de três centrífugas de batelada acionadas por motores de indução e inversores regenerativos.	91
Figura 53 – Potência de quatro centrífugas de batelada acionadas por motores de indução e inversores regenerativos.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Expansão de biomassa, PCH e eólica contratada de 2014 a 2018 [MW].....	22
Tabela 2 – Grandes consumidores industriais – Autoprodução por segmento.....	31
Tabela 3 – Análise de um ciclo típico de uma centrífuga de batelada.	62
Tabela 4 – Consumo típico e diferença de custos de inversores para centrífugas.....	63
Tabela 5 – Dados Técnicos da Centrífugas Automáticas	78
Tabela 6 – Dados de entrada.....	82
Tabela 7 – Quadro comparativo entre as soluções adotadas na primeira e na segunda fase....	93
Tabela 8 – Quadro comparativo do desempenho energetico e produtivo por safra da solução existente e proposta.	94
Tabela 9 – Análise financeira por safra da solução proposta.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômica e Social
CBCME	Comite Brasileiro do Conselho Mundial de Energia
CC	Corrente Contínua
CCEAL	Contratos de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Livre
CCEAR	Contratos de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
COGEN	Associação da Indústria de Cogeração de Energia
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EJ	Exojoule (10^{17})
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GCOI	Grupo de Controle das Operações Integradas
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDE-2023	Plano Decenal de Expansão de Energia 2023
PELP	Plano de Expansão de Longo Prazo
PET	Programa de Expansão de Transmissão
PIE	Produtores Independentes de Energia
PNE-2030	Plano Nacional de Energia 2030
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PROINFA	Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RE-SEB	Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro

RMS	Raiz Quadrada da Média Quadrada
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SRD	Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição
TCH	Tonelada de Cana por Hora
TUST	Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão
UDOP	União dos Produtores
ÚNICA	União da Indústria da Cana-de-Açúcar

LISTA DE VARIÁVEIS EMPREGADAS NAS ANÁLISES

CE	consumo energético [kVAh/Tonelada de massa]
CENS	consumo energético por safra [MVA/Safra]
CESE	consumo energético da solução existente por safra [MVA/Safra]
CPSA	custo da produção por saca de açúcar por tonelada [R\$]
CMW/h	preço médio de venda da energia do bagaço da cana [R\$/MWh]
EES	excedente de energia disponível por safra [MVA/Safra]
EES(R\$)	ganho financeiro com a venda da energia excedente [kR\$/Safra]
GS	ganho de produtividade [sacas de açúcar por safra]
GS(R\$)	ganho financeiro [milhares R\$ por safra]
NC	ciclos em uma hora de trabalho [Ciclos/hora]
NM	número de máquinas em análise
NPS	rendimento energético global da safra [kVA/Saca de Açúcar]
PC	porcentagem de cristais contidos na massa [%]
PE	potência eficaz ao longo do ciclo [kVA]
Prms	potência eficaz da máquina [kVA]
PSNS	produtividade por safra solução atual [Sacas de 50kg/Safra]
PSSE	produção por safra solução existente [Sacas de 50kg/Safra]
VVSA	valor de venda da saca de 50kg de açúcar [R\$/Saca]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	18
1.2	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	20
1.3	OBJETIVOS	24
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	24
2	A ELETRICIDADE NO BRASIL	26
2.1	SETOR ELÉTRICO NACIONAL.....	26
2.2	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL	26
2.3	INCENTIVOS PARA FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA	28
2.4	CENÁRIO DE EXPANSÃO	29
3	USINAS SUCROALCOOLEIRAS.....	32
3.1	MATÉRIA PRIMA.....	35
3.2	RECEPÇÃO, PREPARO E EXTRAÇÃO.	36
3.3	FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR.....	40
3.3.1	Tratamento do Caldo	41
3.3.2	Evaporação.....	43
3.3.3	Cozimento.....	44
3.3.4	Cristalização.....	45
3.3.5	Centrifugação.....	46
3.3.6	Secagem	48
3.4	BIOMASSA.....	49
3.5	COGERAÇÃO.....	52
4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	56
4.1	ADEQUAÇÕES PARA COGERAÇÃO.....	57
4.1.1	Adequação das caldeiras	57
4.1.2	Adequação da Casa de Força	58

4.1.3	Adequação da Moenda.....	60
4.1.4	Adequação das Centrífugas de Açúcar.....	62
5	CENTRÍFUGAS DE BATELADA REGENERATIVAS	64
5.1	CENTRÍFUGAS.....	64
6	ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ECONÔMICA DE UM CONJUNTO DE CENTRÍFUGAS DE BATELADA.....	69
6.1	PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO.....	69
6.1.1	Regeneração de Energia.....	69
6.1.2	Variáveis do Dimensionamento.....	71
6.1.2.1	Potência Ativa.....	71
6.1.2.2	Potência Reativa	72
6.1.2.3	Potência Aparente	72
6.1.2.4	Fator de Potência	73
6.1.2.5	Potência Média Consumida	75
6.1.2.6	Potência Regenerada.....	76
6.1.2.7	Ciclos por Hora.....	76
6.2	ESTRUTURA DA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA	76
6.2.1	Análise Produtiva e Energética	76
6.2.2	Análise Econômica.....	78
6.3	DESCRIÇÃO DA ANÁLISE PROPOSTA	79
7	ESTUDO DE CASO.....	81
7.1	DESCRIÇÃO DAS USINAS SUCROALCOOLEIRAS ANALISADAS.....	81
7.2	DADOS DE ENTRADA E CENÁRIOS CONSIDERADOS NA ANÁLISE	82
7.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
7.3.1	Resultados da Primeira Fase	84
7.3.2	Resultados da Segunda Fase.....	88
7.3.3	Comparação entre os Resultados da Primeira e da Segunda Fase	92

7.3.3.1	Desempenho energético.....	92
7.3.3.2	Desempenho energético, produtivo e financeiro por safra.	93
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Sustentabilidade e otimização energética são temas de enorme importância na atualidade, pois, se torna cada vez mais imprescindível o aumento da eficiência no uso da energia elétrica, utilizando cada vez mais soluções sustentáveis em seu uso e geração, evitando assim novo incremento de necessidade de geração.

A busca de um modelo de desenvolvimento sustentável e de sua consequente implantação já ocorre há algumas décadas, alicerçada na visão crítica da organização da sociedade humana e impulsionada pelos diversos problemas de caráter ambiental e social, tais como o aquecimento global, a ocorrência de grandes desastres ecológicos, a existência de grandes populações que vivem em condições de profunda pobreza e a má distribuição da riqueza natural e humana (REIS et al., 2012).

O Brasil dispõe de uma variedade de recursos energéticos provenientes de recursos renováveis. A biomassa apresenta menores teores de nitrogênio e enxofre, além da vantagem adicional que a quantidade de CO₂ derivada da biomassa pode ser consumida durante o seu crescimento (DUETSCHKE et al., 2014).

O setor sucroalcooleiro do Brasil é um dos pioneiros no que diz respeito ao aproveitamento em larga escala da agro-energia, sendo que se destaca a utilização do bagaço como combustível para geração de energia elétrica e a produção do álcool combustível, utilizado como substituto da gasolina desde as crises do petróleo na década de 1970 (PAIVA, 2009).

No Brasil, as usinas de açúcar e etanol atingiram um estágio de autossuficiência em eletricidade e calor através da cogeração, não dependendo mais de combustíveis fósseis externos. Os excedentes de eletricidade são vendidos à rede pelos chamados autoprodutores, que possuem uma capacidade instalada da ordem de 500 MW, com um potencial de expansão dez vezes maior. A atividade foi impulsionada em 2002 pelo Programa de Incentivo as Fontes Renováveis de Energia, o PROINFA, que na sua primeira fase determinou a compra de 1100 MW de bioeletricidade para a rede nacional. Atualmente a produção de eletricidade é da ordem de 80 kWh por tonelada de cana; a melhor tecnologia disponível permite atingir 120kWh/t cana (GOLDEMBERG et al., 2012).

No final do século 19, as centrífugas construídas verticalmente, com acionamento por correias em sua parte inferior, utilizadas em usinas de açúcar na Europa operavam com rotação do rotor entre 700 a 800 rpm, com carga a ser processada por ciclo limitada entre 150 a 180 kg, enquanto que a duração de um ciclo de centrifugação era de aproximadamente 5-7 minutos. Além disso, a coloração do açúcar não era aceita pelo mercado, devido à baixa rotação aplicada até então e a limitação da automação do controle do processo. Com o passar dos anos e a evolução da tecnologia, se tornou imprescindível aumentar a capacidade de centrifugação das plantas, bem como minimizar o consumo de energia no processo de centrifugação de açúcar e isto só foi possível com a utilização de um motor elétrico de indução trifásico acionado por um inversor de frequência regenerativo, operado por um controlador lógico digital. A partir daí, as centrífugas começaram a operar com rotações entre 1200 a 1500 rpm, até 20 toneladas de massa cristalizada por hora para fabricação de açúcar, obtendo assim uma eficiência energética 2,5 vezes maior quando comparada aos sistemas de acionamento convencionais. (DAVIDENKO et al., 2004).

Este estudo visa quantificar o consumo de energia elétrica das centrífugas de açúcar de uma unidade industrial. Cada ciclo de centrifugação é composto por diversas etapas, sendo estas: carregamento, aceleração para centrifugação, centrifugação, desaceleração para descarregamento e, por fim, descarregamento. A operação da centrífuga é por batelada, ou seja, cada ciclo pode se repetir de 15 até 25 vezes por hora, dependendo do modelo e, principalmente, do acionamento da máquina.

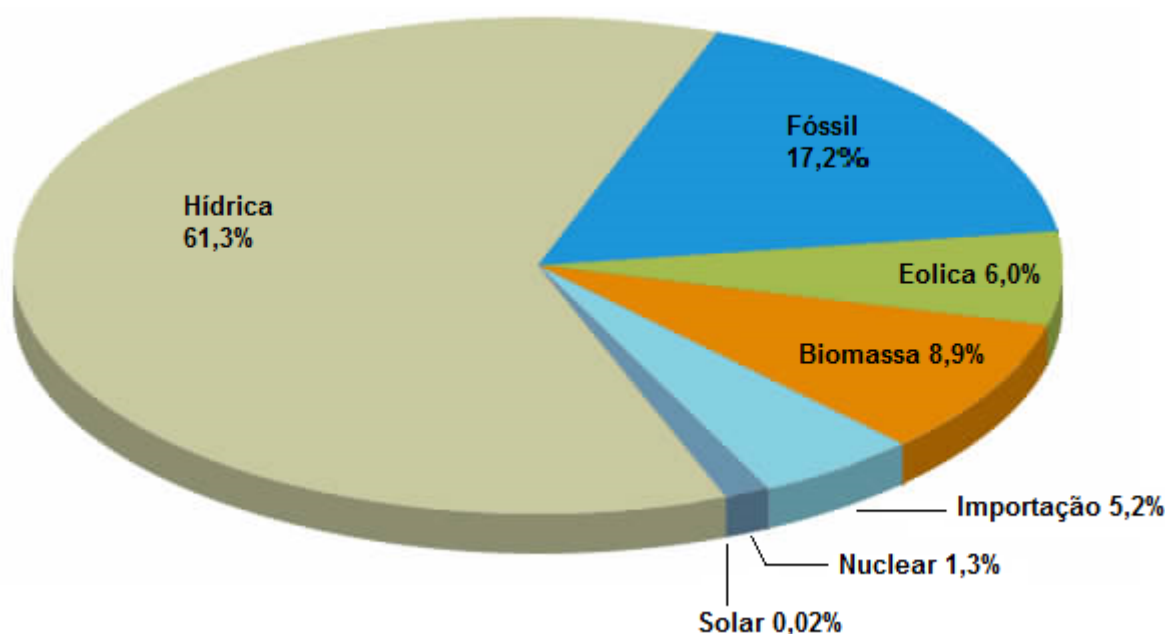
Esta operação cíclica traz um desperdício energético nas diversas etapas do processo e a maior perda ocorre na etapa de desaceleração para descarregamento, onde existe uma quantidade considerável de energia cinética sendo dissipada na forma de calor. Este trabalho irá atuar nesta etapa, onde a aplicação do inversor regenerativo traz um ganho no consumo de energia por ciclo, pois faz com que o motor deixe de ser um consumidor para se tornar um gerador de energia, devolvendo energia gerada para a rede, contribuindo para a diminuição da demanda e possibilitando o aumento da oferta de exportação de energia, uma vez que estas plantas são cogeneradoras de energia renovável provinda da biomassa da cana-de-açúcar.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A geração de energia elétrica no Brasil é conhecida como uma das mais renováveis do mundo e consegue esse status pela presença de aproveitamentos hidroelétricos. A produção de energia hídrica em 2014 só foi menor que na China e no Canadá (BP, 2015).

A figura 1 representa a capacidade instalada para produção de energia elétrica por fonte no país, com dados em participação relativa. A potência instalada total é de 155,6 GW, sendo 95,5 GW provenientes da fonte hídrica e 13,8 GW da Biomassa (BRASIL [d], 2016).

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte [%].



Fonte: (BRASIL [d], 2016).

Dentre as energias oriundas de fontes renováveis nota-se que a biomassa é a segunda fonte mais representativa no país. Devido à disponibilidade da matéria-prima, ao fato de ser renovável e à importância desta fonte para atender a sazonalidade da fonte hidrelétrica, desde 2004 o governo tem adotado diversos incentivos para aumentar a participação da bioeletricidade na matriz energética nacional. Com a reestruturação ocorrida no setor elétrico brasileiro, a participação da biomassa de cana tem aumentado neste segmento, uma vez que as políticas nacionais formuladas fomentaram a diversificação da geração elétrica e a descentralização do mercado.

Segundo MME (2016) estima-se a existência de 2 trilhões de toneladas de biomassa no globo terrestre, ou seja, cerca de 400 toneladas per capita, o que, em termos energéticos, corresponde a oito vezes o consumo mundial de energia primária, hoje da ordem de 400 EJ por ano. Uma das principais vantagens da biomassa é o seu aproveitamento direto por meio da combustão da matéria orgânica em fornos ou caldeiras. Atualmente, a biomassa vem sendo bastante utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade de comunidades isoladas da rede elétrica.

A principal biomassa residual gerada no processamento industrial da cana-de-açúcar é o bagaço. O aproveitamento da energia deste insumo, tanto na produção de calor quanto na de eletricidade, vem ocorrendo desde a implantação das primeiras usinas sucroalcooleiras. Sua utilização tinha como destino, a princípio, o autoconsumo, suprimindo as necessidades destas unidades produtoras. Posteriormente, a evolução da eficiência energética do setor permitiu a produção de excedentes de energia elétrica, que passaram a ser exportados para o SIN, o que ampliou a importância do seu uso na matriz nacional (BRASIL [b], 2014).

A Tabela 1 ilustra as expansões previstas entre os anos de 2014 e 2018 para as energias renováveis incentivadas, como Biomassa, PCH e Eólica. Nota-se que, dentre estas três fontes, a biomassa é a segunda com maior representatividade em termos de novos empreendimentos. É importante observar, também, que as expansões previstas começam a cair nos anos seguintes a 2014; isto se deve ao fato de os empreendimentos de 2014 e de 2015 já terem sido licitados quando da elaboração deste estudo por BRASIL [b] (2014) e à previsão da queda do crescimento do país nos anos seguintes.

Tabela 1– Expansão de biomassa, PCH e eólica contratada de 2014 a 2018¹ [MW].

Tipo	Região	2014	2015	2016	2017	2018
		Potência (MW)				
Biomassa	Sudeste/Centro-Oeste	503	161	50	0	398
	Sul	42	0	0	0	0
	Nordeste	17	0	0	0	300
	Norte	255	0	10	0	0
	TOTAL	817	161	60	0	698
PCH	Sudeste/Centro-Oeste	169	71	0	0	286
	Sul	40	30	18	0	113
	Nordeste	0	0	0	0	6
	Norte	21	32	12	3	0
	TOTAL	230	133	30	3	405
Eólica	Sudeste/Centro-Oeste	0	0	0	0	0
	Sul	362	543	432	28	152
	Nordeste	2.899	3.024	1.307	52	2.188
	Norte	0	0	58	203	0
	TOTAL	3.261	3.567	1.797	283	2.340
TOTAL		4.308	3.861	1.887	286	3.443

Fonte: (BRASIL [b], 2014).

Em contrapartida, segundo um estudo atual da ABESCO (2016) sobre a eficiência energética, o Brasil desperdiçou 250 mil GWh de energia elétrica em seis anos, o que equivale a mais de R\$ 62 bilhões, ou, em termos de geração, metade da energia produzida por Itaipu. O alto nível de desperdício de energia elétrica não só aumenta o preço da energia, como também reduz a competitividade do setor industrial e comercial. Em muitos casos, porém, implementar medidas de eficiência energética é bem simples, evita o desperdício e aumenta a competitividade econômica das empresas. No Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf, 2011), o Ministério de Minas e Energia (MME) projeta um potencial de conservação de energia elétrica de 0,6 % por ano, chegando a uma redução de 106 mil GWh no ano de 2030.

Para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, foram avaliados trabalhos relacionados ao tema, com a finalidade de se estabelecer um referencial.

Pazian (2004) apresenta o estudo de uma metodologia para análise do potencial de cogeração de energia elétrica em uma usina de açúcar e etanol, simulando através do software MATLAB/SIMULINK os ganhos com a substituição de caldeiras que operam a pressão de 21kgf/cm² e à temperatura do vapor de 300°C por caldeiras que operam a pressões de 64kgf/cm² e à temperatura do vapor de 480°C, levando em consideração o consumo do combustível (bagaço de cana), a eficiência dos respectivos equipamentos empregados para geração de

¹ Observações: 1) Os valores da tabela indicam o acréscimo de potência instalada entre os meses de janeiro e dezembro de cada ano; (2) Inclui a capacidade contratada nos leilões de energia de reserva; (3) Inclui os projetos sinalizados como sem impedimento para entrada em operação comercial pela fiscalização da ANEEL.

energia, bem como a eficiência global da planta, implementando tecnologias em outros equipamentos para minimizar o consumo de vapor por tonelada de cana processada. O aproveitamento de todo o potencial de cogeração visando o aumento da oferta de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro consiste basicamente na modernização de seu parque industrial utilizando tecnologias energeticamente mais eficientes.

Barja (2006) apresenta um estudo que faz uma abordagem sistêmica dos aspectos técnicos, econômicos e legais, de forma a consolidar o empreendimento de cogeração como parte intrínseca do sistema elétrico nacional, demonstrando que a viabilidade de um empreendimento de cogeração depende também de outros fatores, tais como: o preço da eletricidade, o preço do combustível e a liquidez da venda de excedentes elétricos. Por isso a decisão do investidor precisa sempre estar amparada em uma análise que envolva a tecnologia empregada, o benefício econômico e a estratégia de atuação no mercado de eletricidade.

Reis et al. (2012 p.69 apud HELIO INTERNATIONAL, 2000) apresentam um estudo que aborda indicadores para a sustentabilidade energética, demonstrando que promover um maior acesso aos serviços energéticos é essencial para o desenvolvimento sustentável de qualquer nação, uma vez que há uma necessidade urgente de reduzir drasticamente os impactos decorrentes do consumo de energia, tanto em nível local como global, e que países altamente dependentes de importação e exportação de energia são vulneráveis a choques externos e reduzir esta dependência ajudará o desenvolvimento do país. Isto mostra a íntima relação existente entre a energia e o desenvolvimento sustentável, o que permite estabelecer indicadores que possam fornecer subsídios para políticas voltadas ao desenvolvimento energético de um país. Assim são definidos quatro dimensões a serem utilizadas como indicadores, meio ambiente, sociedade, economia e tecnologia.

Queiroz (2008) apresenta um estudo do potencial de geração das usinas termelétricas à biomassa de cana, destacando sua importância para a matriz energética nacional, demonstrando que devido às suas características, a biomassa é um tipo de fonte que pode contribuir para a diminuição do risco de falta de energia, bem como, estuda e apresenta as alternativas para aumentar a disponibilidade de energia excedente em unidades sucroalcooleiras, através da redução do auto-consumo das unidades.

A disponibilidade de energia nas condições de quantidade e qualidade adequadas, a custos competitivos, tem-se constituído em um dos mais importantes pré-requisitos para o desenvolvimento econômico das nações. Em vista disso, a energia tem sido tratada como um bem de natureza estratégica, e não por acaso a segurança energética tornou-se um dos temas mais relevantes da agenda mundial. De fato, o Brasil é uma nação com nível de

desenvolvimento ainda insuficiente, ao qual se associam um baixo consumo específico de energia, carência de infra-estrutura energética e concentração do uso das riquezas naturais. O posicionamento do país no cenário internacional é um fator essencial para o esforço de reverter esse quadro. Historicamente, o Brasil apresenta uma importante vantagem comparativa no setor energético, relacionada à abundância de recursos naturais a baixos custos em termos relativos. A questão que se coloca para o país nos próximos anos é: quais desafios serão enfrentados e quais ações ter-se-á que empreender para manter essa vantagem comparativa? (TOLMASQUIM, 2007).

1.3 OBJETIVOS

1. Elaborar um estudo, de fácil interpretação pelo usuário, que permita a análise de eficiência energética e econômica na substituição de centrífugas com acionamento e controle convencionais utilizando motores de baixa eficiência, por uma solução com acionamento por inversores regenerativos utilizando motores de alto rendimento.
2. Aplicando dados de uma solução real, fazer a coleta dos registros de consumo energético por tonelada de massa processada e fazer uma análise comparativa entre o cenário atual existente e o proposto, que considere a utilização de máquinas modernas com acionamento por inversores regenerativos e motores de alta eficiência.
3. Utilizar esta análise para calcular os ganhos de eficiência energética e econômica que o investimento trará, comprovando a importância do emprego de equipamentos de alta eficiência no processo, para assim possibilitar o melhor aproveitamento de geração da planta para o SIN.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 aborda o cenário atual do mercado de geração de energia elétrica no Brasil, contextualizando toda a linha de pesquisa utilizada no desenvolvimento desta dissertação.

O capítulo 3 detalha as características e particularidades de uma planta de biomassa, promovendo uma visão geral dos principais equipamentos mecânicos e elétricos que a constitui.

O capítulo 4 descreve as particularidades da eficiência energética em uma planta sucroalcooleira, destacando os equipamentos mais representativos no consumo de energia.

O capítulo 5 indica as informações, características e detalhes do caso real para o qual será aplicada a metodologia desenvolvida e traz os resultados e discussões deste estudo de caso.

O capítulo 6 mostra a estrutura utilizada para a análise de eficiência energética e econômica proposta neste trabalho, detalhando os principais parâmetros para a análise do potencial de incremento de eficiência energética, além de descrever a metodologia de análise proposta neste.

O capítulo 7 aborda o caso de estudo deste trabalho, onde são apresentados os dados de entrada, os resultados e as discussões.

O capítulo 8 mostra as conclusões finais do trabalho e encerra a dissertação indicando algumas propostas para trabalhos futuros.

2 A ELETRICIDADE NO BRASIL

2.1 SETOR ELÉTRICO NACIONAL

Desde a Revolução Industrial, a competitividade econômica dos países e a qualidade de vida de seus cidadãos são intensamente influenciadas pela energia. Em um mercado global e em face das crescentes preocupações com o meio ambiente, essa influência se mostra cada vez mais decisiva. Nesse contexto, as economias que melhor se posicionam quanto ao acesso a recursos energéticos de baixo custo e de baixo impacto ambiental obtêm importantes vantagens comparativas. Nas próximas décadas, essa questão se apresenta para o Brasil a um só tempo como um desafio e uma oportunidade. Desafio, porque o desenvolvimento econômico e social demandará uma expressiva quantidade de energia e com isso um alto grau de segurança e de sustentabilidade energéticas. Oportunidade, porque o Brasil dispõe de condições especiais de recursos energéticos renováveis e de tecnologia para transformar suas riquezas naturais em energia e dessa forma agregar valor à sua produção de riqueza.

Para enfrentar esse desafio e aproveitar essa oportunidade, é necessário orientar e catalisar esforços de investidores, empreendedores e consumidores do setor energético, visando uma adequada interação entre esses atores. Nesse sentido, é fundamental a contribuição das instituições e equipes responsáveis pelo planejamento energético nacional, antecipando as situações, mapeando as alternativas, sugerindo estratégias, enfim, norteando as decisões. As necessárias transformações no setor energético nacional nos próximos 25 anos compreendem capacitação tecnológica, capacidade de gestão e inovação, viabilização de recursos para os investimentos e capacidade de articulação institucional, entre outras ações (TOLMASQUIM, 2007).

2.2 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

A geração e a transmissão de energia elétrica no Brasil possuem um sistema principal, composto por um conjunto de usinas geradoras, linhas de transmissão e ativos de distribuição, denominado Sistema Interligado Nacional (SIN). Formado pelas conexões de instalações inicialmente restritas ao atendimento exclusivo de suas regiões de origem², o SIN é uma imensa

² Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte.

“rodovia elétrica” que conecta e abrange a maior parte do território nacional (BRASIL [a], 2008).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela coordenação e controle da operação do SIN, realizada pelas companhias geradoras e transmissoras, sob a fiscalização e regulação da Aneel. Entre os benefícios desta integração e operação coordenada está a possibilidade de troca de energia elétrica entre regiões. Isto é particularmente importante em um país como o Brasil, caracterizado pela predominância de usinas hidrelétricas localizadas em regiões com regimes hidrológicos diferentes.

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (BRASIL [e], 2016).

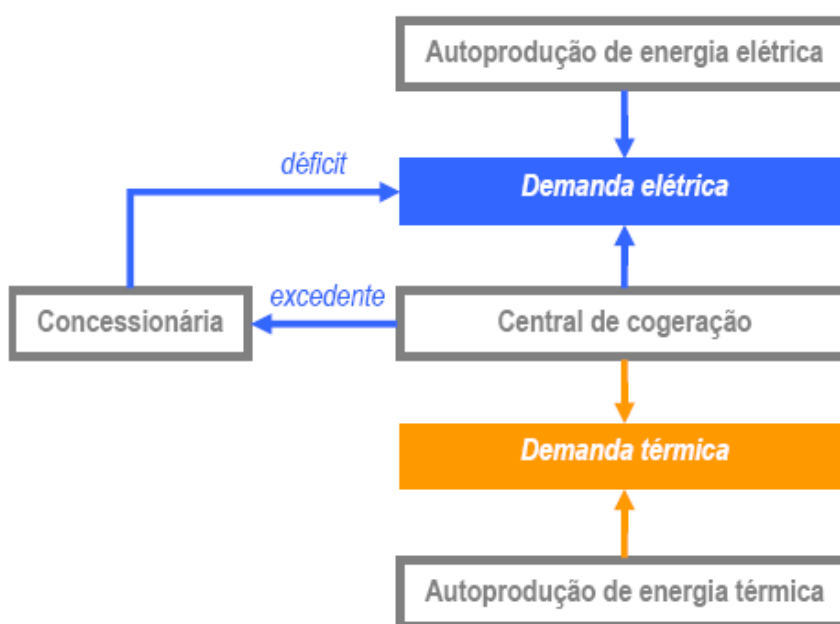
Os Sistemas Isolados são de pequeno porte, concentrados basicamente na região Norte do país e predominantemente abastecidos por usinas térmicas movidas a óleo diesel e óleo combustível. São assim denominados por não estarem interligados ao SIN e por não permitirem o intercâmbio de energia elétrica com outras regiões, em função das peculiaridades geográficas da região em que estão instalados. Por ser predominantemente térmico, os sistemas isolados apresentam custos de geração superiores ao SIN. Além disso, as dificuldades de logística e de abastecimento dessas localidades elevam o custo com o frete dos combustíveis.

No SIN estão conectados uma diversidade de agentes comercializando energia de diferentes fornecedores, independentemente de suas localizações físicas, no qual é garantido por lei o acesso e uso das redes elétricas aos fornecedores e consumidores, indistintamente, para viabilização do transporte de energia, garantindo o exercício da competição. No caso de conexão de uma central cogeneradora ao SIN, o primeiro passo é a solicitação do acesso informando os aspectos técnicos da conexão à respectiva concessionária ou permissionária de distribuição ou, no caso de tensões a partir de 230 kV, ao ONS ou, ainda, à concessionária de transmissão, que analisarão a necessidade ou não de reforços na rede a ser acessada. Com o “Parecer de Acesso” emitido são celebrados os contratos de uso e conexão dos sistemas elétricos, que variam dependendo do ponto da conexão.

Segundo Barja (2008) ao estudar-se um empreendimento de cogeração para o suprimento de demandas simultâneas de energia térmica e elétrica são analisados vários aspectos técnicos

e econômicos quanto à sua implantação e utilização. Entre os mais importantes, está a caracterização das demandas térmica e elétrica associadas, que definirão o porte da central. Em seguida, está a disponibilidade de combustível e, não menos importante, a conexão da central à rede da concessionária de distribuição ou de transmissão, conforme sua localização e nível de tensão. A Figura 2 ilustra o excedente versus o déficit.

Figura 2 – Excedente versus Déficit



Fonte: (BALESTIERI, 2002).

2.3 INCENTIVOS PARA FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

Os programas e políticas de eficiência energética são importantes ferramentas para a redução da emissão de gás carbônico e possíveis alterações climáticas, bem como para conter o rápido crescimento do consumo de energia no mundo, atenuando o esgotamento de recursos energéticos (SANTOS, 2012).

As estratégias de produção, transmissão, distribuição e uso racional da energia têm um papel preponderante na busca do desenvolvimento sustentado. As necessidades de uma visão ampla do problema e de métodos de avaliação que ponderem os diversos aspectos técnicos, ambientais, sócio-econômicos e sócio-políticos envolvidos requerem modificações na forma tradicional de estudar e planejar tais estratégias (UDAETA, 2004).

Em meio à crise energética brasileira vivida no final do século passado, foi necessário o aumento da oferta de energia elétrica, com ações rápidas e resultados a curto prazo. Foi então

que o governo começou a olhar para fontes até então pouco exploradas, porém com grande potencial a ser ofertado, como a energia da biomassa, a energia eólica e a energia das pequenas centrais hidrelétricas.

Estas fontes, além de responderem mais rapidamente à necessidade de oferta de energia, deveriam atender também aos critérios ambientais e sociais. Unindo estas duas necessidades o governo criou o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), por meio da Lei nº 10.438 de 2002, revisado pela Lei nº 10.762 de 2003 e lei nº 11.075 de 2004. Esta iniciativa de caráter estrutural, visava atingir benefícios técnicos, ambientais e socioeconômicos, através de projetos de geração que utilizassem fontes limpas e sustentáveis e era apoiada financeiramente com recursos do BNDES.

Segundo ELETROBRÁS (2016), o PROINFA é considerado o maior programa do mundo em incentivo às fontes alternativas de energia elétrica, pois implantou, até 2011, um total de 119 empreendimentos, constituído por 41 parques eólicos, 59 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 19 centrais térmicas a biomassa. Sua implantação contribuiu para a diversificação da matriz energética nacional, além de ter fomentado a geração de cerca de 150 mil empregos diretos e indiretos em todo o país, proporcionando grande avanço industrial e a internalização de tecnologia de ponta. Além disso, estima-se que o programa possibilita a redução de emissões de gases de efeito estufa equivalente a aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de CO₂ eq/ano.

2.4 CENÁRIO DE EXPANSÃO

O Brasil dispõe de grande potencial energético, com destaque para as fontes renováveis de energia (hidráulica, eólica, biomassa e solar). Para continuar fazendo frente ao seu crescimento, de forma segura, econômica e com respeito à legislação ambiental, é importante que no planejamento para expansão sejam priorizadas estas fontes, compatibilizando esta participação com o atendimento à carga de forma segura e tendo em vista o compromisso de manter seu crescimento econômico apoiado em uma matriz energética limpa.

De acordo com os dados do Banco de Informações de Geração da ANEEL – BIG – representado na Figura 1, a capacidade instalada total do sistema elétrico brasileiro no final de 2016 era de cerca de 155,6 GW, dos quais 13,8 GW, ou seja 8,9% são provenientes da biomassa. Esse total engloba não apenas as unidades geradoras do SIN, mas conta, também, com aquelas instaladas nos sistemas isolados e a autoprodução clássica.

As usinas térmicas a biomassa constituem mais uma fonte renovável disponível para compor a expansão da oferta de geração. Nessa categoria, destacam-se os empreendimentos que utilizam resíduos do processamento industrial da cana-de-açúcar, principalmente o bagaço. O potencial técnico de produção para o SIN de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar, considerando o aproveitamento ótimo do bagaço, permitiria ofertar 7,7 GW médios até 2023, dos quais 1,4 GW médio já foi contratado nos leilões e com início de suprimento até 2018. O potencial desta fonte está localizado principalmente nos estados de SP, GO, MG, MS e PR, portanto, próximo dos maiores centros consumidores de energia. Cabe ressaltar que os investimentos necessários para o desenvolvimento dessa fonte estão sujeitos à volatilidade do setor sucroalcooleiro, o que pode eventualmente inibir a ampliação da capacidade de geração, assim como a sua competitividade nos leilões com outras fontes, especialmente a eólica (BRASIL [b], 2016).

Usinas térmicas cogeradoras a biomassa são responsáveis tanto pela autoprodução³ de energia elétrica, para suprir a própria demanda da planta sucroalcooleira, como, para utilizar seus excedentes de energia gerados para venda ao SIN. Nem todos os empreendimentos sucroalcooleiros estão interligados ao SIN, entretanto, todos possuem autoprodução de energia para suprir a própria demanda. Sem a autoprodução de energia, a fabricação do açúcar e do etanol não se pagariam, ou seja, seria necessário subsídios do governo.

A grande representatividade na autoprodução de energia em empreendimentos sucroalcooleiros pode ser notada na Tabela 2, que ilustra a projeção da autoprodução de energia elétrica, para o horizonte de dez anos, apresentando uma expansão de 6,1% ao ano, atingindo 91 TWh em 2023.

³ Autoprodução se refere à geração de energia elétrica de um consumidor com instalações próprias de geração localizadas junto à unidade de consumo, não utilizando, portanto, a rede elétrica de distribuição ou transmissão.

Tabela 2 – Grandes consumidores industriais – Autoprodução por segmento.

Segmento	2014	2018	2023
	GWh		
Siderurgia	5.205	5.205	5.205
Petroquímica	2.459	2.459	2.459
Celulose e papel	11.187	16.096	20.362
Açúcar e álcool	15.226	18.247	20.584
E&P	10.015	18.093	27.586
Outros setores	9.079	11.724	13.507
Total	53.171	71.825	89.703

Fonte: (BRASIL [b], 2016).

3 USINAS SUCROALCOOLEIRAS

Uma usina sucroalcooleira é uma unidade industrial que utiliza a cana como matéria-prima para transformá-la em açúcar, etanol e energia elétrica. Desde que foi trazida para o Brasil, a cana-de-açúcar tem importante papel na economia nacional. Principal produtor e exportador de açúcar e álcool do mundo, o Brasil tem o menor custo de produção entre os principais competidores do mercado internacional, além de liderar o conhecimento da biotecnologia da cana. Até a década de 1990, cabia ao governo a responsabilidade pelo planejamento e a gestão desses mercados. A partir de então, essas tarefas foram repassadas integralmente ao setor privado, onde prevalece o regime de livre mercado, sem subsídios, em que os preços são definidos de acordo com as oscilações de oferta e demanda (BRASIL [k], 2016). A Figura 3 ilustra uma unidade sucroalcooleira em operação.

Figura 3 – Usina Sucroalcooleira Vertente, município de Guaraci-SP.



Fonte: (JORNAL CANA, 2016).

O cultivo e o processamento da cana-de-açúcar no Brasil teve seu início ainda no período colonial, entre os séculos XVI e XVII e foi a primeira atividade economicamente organizada no país. Em seu início esta indústria era familiar, comandada por senhores de engenho cujas propriedades agrícolas para cultivo da cana foram entregues pela coroa portuguesa; a mão-de-obra empregada tanto nos campos quanto nos engenhos era escrava (UNICA, 2016).

Atualmente a cana-de-açúcar é uma das principais atividades agroindustriais do país, gerando milhões de empregos no campo e na indústria. É a única cultura economicamente sustentável na fabricação de açúcar e/ou etanol, uma vez que culturas como a beterraba européia, utilizada na fabricação de açúcar, e o milho norte-americano, utilizado na fabricação de etanol, precisam de subsídios do governo para que possam ser fabricados. Segundo a CONAB (2016) a área colhida no Brasil de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2016/17 deverá ser de 9.073,7 mil hectares, 4,8% maior se comparada com a safra 2015/16. A produção de cana-de-açúcar estimada para a safra 2016/17 é de 690,98 milhões de toneladas. O crescimento está estimado em 3,8% em relação à safra anterior. A Figura 4 ilustra o potencial produtivo para o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil.

Figura 4 – Potencial produtivo para o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil – Sem irrigação.



Fonte: (UDOP, 2016).

A produção brasileira de açúcar deverá apresentar incremento de 41,98% entre a safra 2005/06 e a previsão para a safra 2016/17, podendo atingir 37.509,9 mil toneladas. A previsão é de que haja aumento de 12% em relação à safra anterior, baseado na forte expectativa de evolução na área plantada, que deverá repercutir num aumento da produção, ora estimado em 37,5 milhões de toneladas. Porém, a produção brasileira de etanol na safra 2016/17 será de 30,3

bilhões de litros, resultando em uma redução de 121 milhões de litros, que equivale a um resultado 0,4% menor que o período anterior, ou seja, se mantendo estável (CONAB, 2016).

As usinas sucroalcooleiras em operação no país estão em sua grande maioria localizadas no Centro-Sul-Sudeste, principalmente nos estados de São Paulo, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Existe também uma quantidade expressiva de unidades produtoras na região da zona da mata nordestina, com destaque para os estados de Alagoas e Pernambuco. Entretanto em função do clima e do relevo, a produtividade é menor e, na maioria dos casos, as usinas destes estados precisam de subsídios do governo para se manterem. De acordo com a NOVACANA (2016) o Brasil possui atualmente 371 unidades sucroalcooleiras ativas. A Figura 5 ilustra as unidades produtoras em operação atualmente no país.

Figura 5 – Usinas Sucroalcooleiras em operação no Brasil.

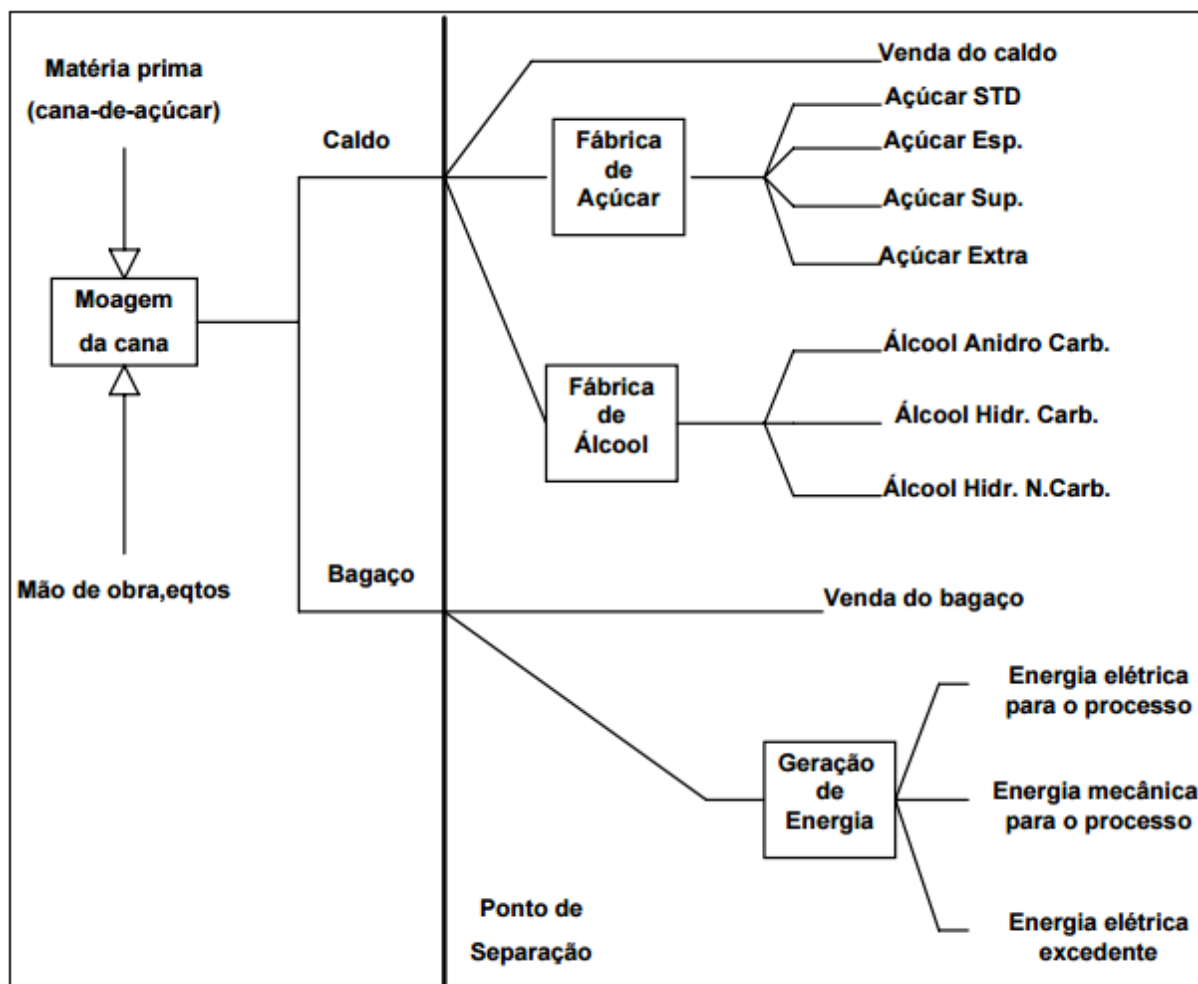


Fonte: (UDOP, 2016).

Na etapa indutrial o processamento da cana para a fabricação do açúcar, do etanol e da energia elétrica envolve diversas etapas de transformações físicas e químicas. A Figura 6 ilustra de forma esquemática a sequência do processo, onde a moagem ou extração do caldo da cana é

feita inicialmente na moenda; o caldo extraído é destinado às fábricas de açúcar e etanol, e o bagaço é enviado para queima nas caldeiras para geração de vapor e energia elétrica.

Figura 6 – Caracterização do processo de produção da fase industrial de uma usina sucroalcooleira



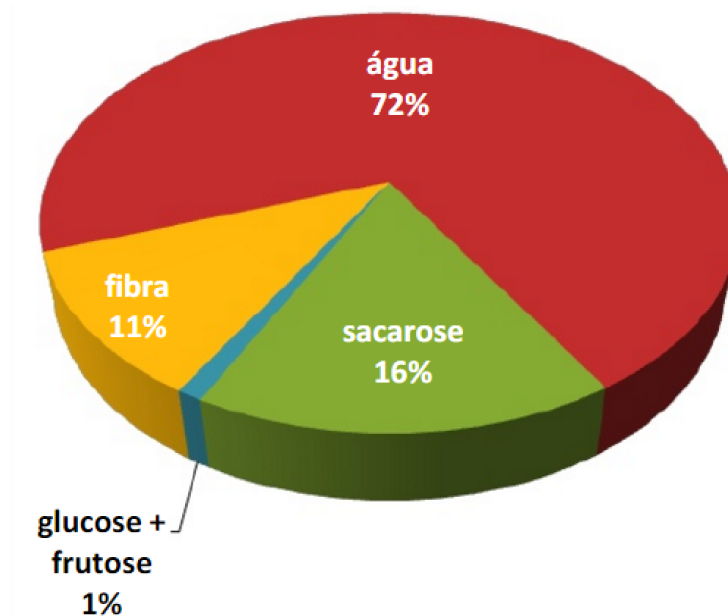
Fonte: (BRUNSTEIN, 1995).

3.1 MATÉRIA PRIMA.

A cana-de-açúcar é formada por folhas, colmos, raízes e eventualmente, flores. Sua composição contém umidade (água), sacarose, fibra e glicose mais frutose, cujas proporções de grandeza se mantém, mas seus valores podem variar em função de inúmeros parâmetros, como a variedade da cana, a quantidade de cortes, a localização geográfica, a qualidade do solo, o momento da colheita etc. A Figura 7 ilustra a composição típica de uma variedade de cana. As variedades normalmente são escolhidas de acordo com as condições locais e com o período da

colheita (mais precoce ou mais tardia), tendo sempre como objetivo a maior porcentagem possível de sacarose para a produção de açúcar e etanol. Entretanto, em alguns casos, pode-se priorizar a quantidade de fibra, privilegiando a geração de energia elétrica.

Figura 7 – Exemplo de composição de uma variedade de cana.



Fonte: (Adaptado de FERNANDES, 2003).

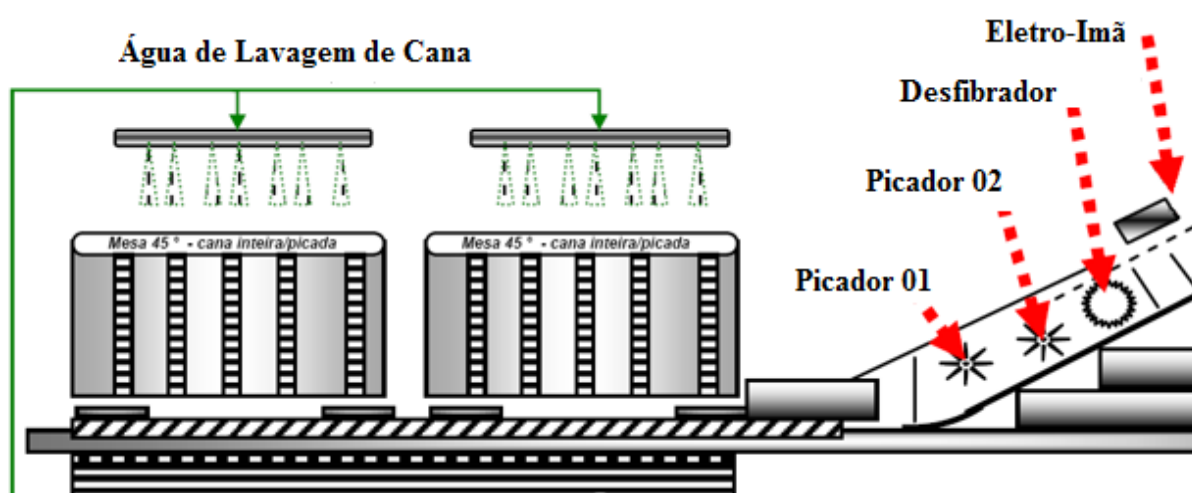
A sacarose é o elemento mais desejado na composição da cana, pois é a responsável pela produção do açúcar e do etanol. Em outras palavras, ela expressa a quantidade de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada, enquanto a glucose e a frutose são utilizadas somente na produção do etanol após serem convertidas em sacarose durante o processo. A fibra é a matéria sólida contida na cana, insolúvel em água, presente nos colmos, nas ponteiras e nas folhas, a qual após a extração é denominada de bagaço ou biomassa da cana, e é destinada às caldeiras para produção de vapor e de eletricidade. A água é o elemento de maior representatividade na composição da cana e não tem finalidade nos produtos finais.

3.2 RECEPÇÃO, PREPARO E EXTRAÇÃO.

Após a colheita no campo, a cana-de-açúcar é enviada para industrialização, onde passa por diversos processos até a obtenção dos produtos finais. Conforme ilustra a Figura 8, na indústria, primeiramente a cana é descarregada dos caminhões em mesas de 45° de inclinação

compostas por esteiras, onde a cana pode ou não ser lavada, dependendo das particularidades de cada usina. Em seguida, a cana é conduzida por uma esteira onde é preparada para a moagem, sendo picada e desfibrada, além de ser exposta a um campo eletromagnético gerado por um eletroímã para a retirada de partículas magnéticas que possam danificar os equipamentos seguintes (REIN, 2007).

Figura 8 – Recepção e preparo da cana.



Fonte: (UDOP, 2016).

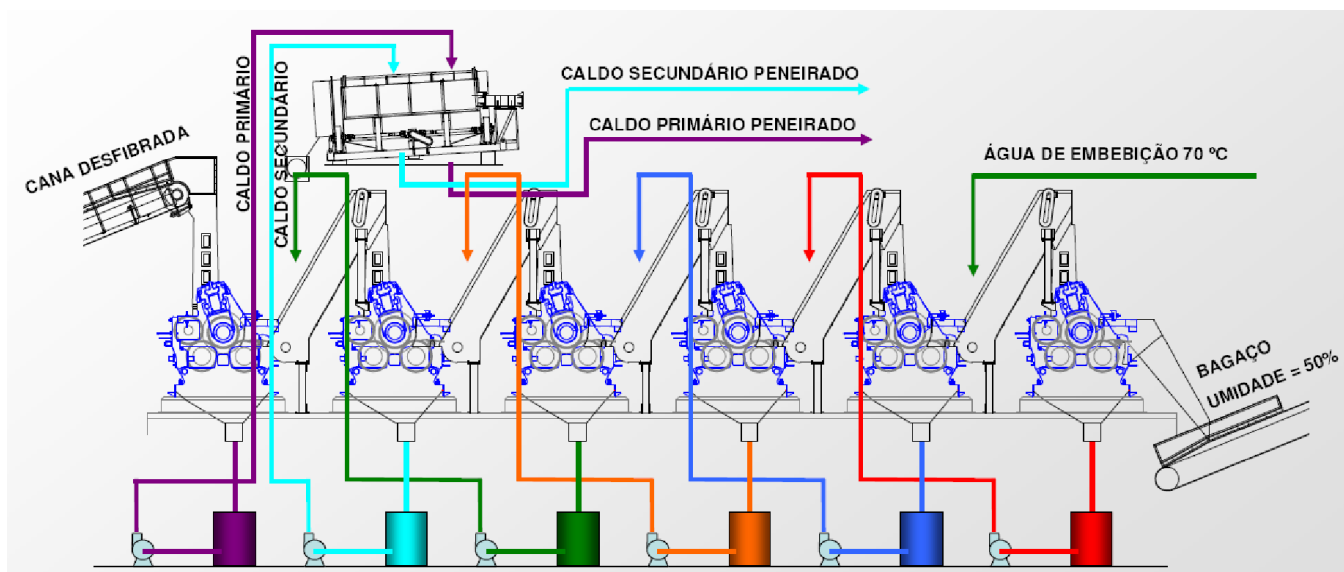
Após o preparo da matéria prima, esta segue para a etapa de extração, onde o objetivo é separar a parte líquida, que contém a sacarose, da parte sólida, que é a fibra ou bagaço (REIN, 2007).

A extração pode ser feita de duas formas, por meio de dois equipamentos totalmente distintos, sendo estes, moendas ou difusores. Na extração por moenda o caldo é extraído por compressão mecânica, no qual a cana é comprimida entre cilindros de aço. A Figura 9 ilustra uma moenda.

A moagem é um processo de extração do caldo que consiste em fazer a cana passar entre dois rolos, com uma pressão pré-estabelecida aplicada a eles. A moenda deve extrair o caldo deixando o bagaço no final do processo com um grau de umidade que permita sua utilização como combustível nas caldeiras. A moenda é normalmente formada por quatro a sete ternos de cilindros de aço em série. Após a passagem pelo primeiro destes ternos, a proporção de caldo em relação à fibra cai de aproximadamente 7 para algo entre 2 a 2,5, ficando difícil extrair este caldo residual, o artifício usado é o que chamamos de embebição. A embebição pode ser simples, composta, e com recirculação, sendo o tipo composta o mais usado. Neste caso, água

é injetada na camada de cana entre os dois últimos ternos e o caldo de cada terno é injetado antes do terno anterior até o segundo terno. Normalmente, o caldo extraído no primeiro terno é enviado para a fábrica de açúcar (por ser de melhor qualidade) e o restante do caldo vai para a destilaria para a fabricação do etanol. A eficiência de extração de açúcares varia de 94,0% a 97,5% e a umidade final do bagaço fica em torno de 50% (NOVACANA, 2016).

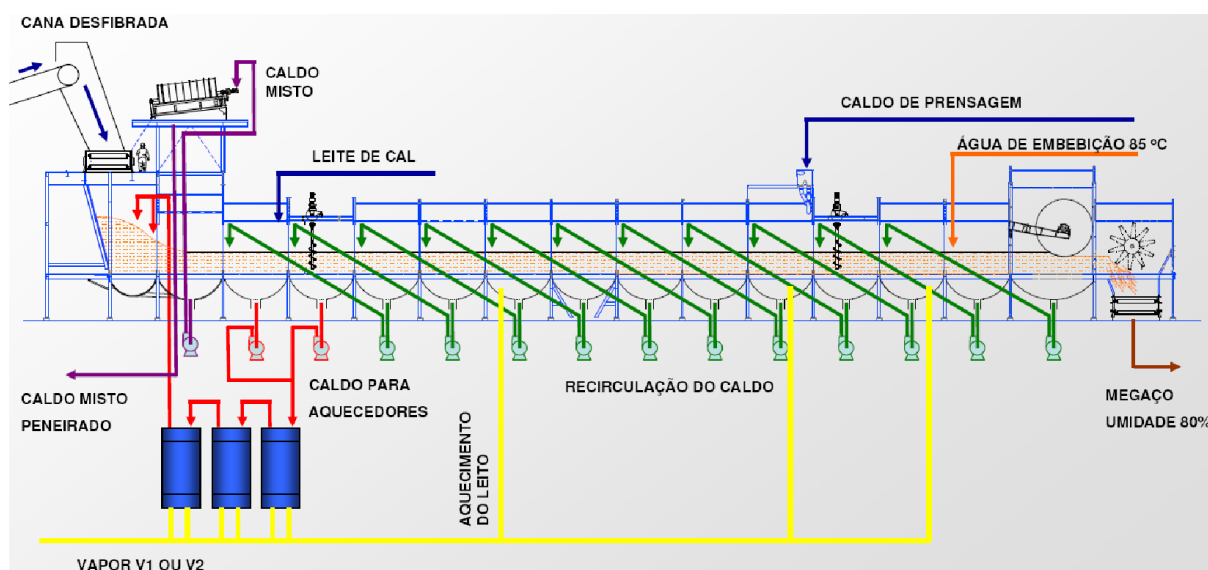
Figura 9 – Moagem da cana.



Fonte: (DEDINI, 2016).

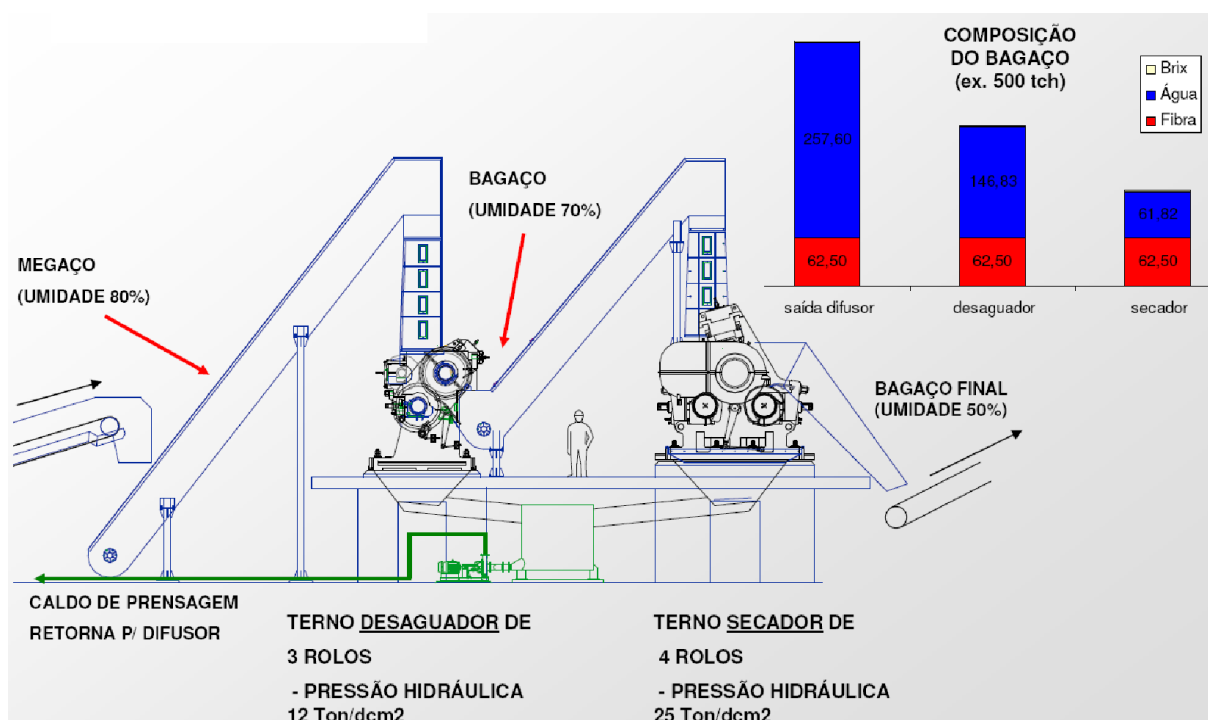
No processo de extração por difusor, a retirada do caldo consiste no deslocamento por lixiviação (lavagem), na qual a sacarose remanescente no interior das células é extraída por difusão onde, a exemplo da extração por moagem, estes processos também são executados em conjunto com sucessiva embebições. Porém, devido à elevada umidade do bagaço, a qual impossibilita a queima deste na caldeira, se faz necessário o emprego de dois ternos denominados terno desaguador e terno secador. A Figura 10 ilustra o processo de lixiviação e difusão e a Figura 11 ilustra a etapa de secagem do bagaço, para que este possa ser encaminhado para a caldeira.

Figura 10 – Extração por difusor - Processo de Lixiviação e Difusão



Fonte: (DEDINI, 2016).

Figura 11 – Extração por difusor - Processo de Secagem do bagaço



Fonte: (DEDINI, 2016).

Como pode ser notado nas figuras anteriores, apenas no caso da extração por moenda é possível a separação de caldo entre primário (o qual é retirado no primeiro terno) e secundário (o qual é retirado no segundo terno e que sofre embebições dos ternos posteriores). O caldo primário é comumente utilizado para fabricação de açúcar enquanto que o caldo secundário é

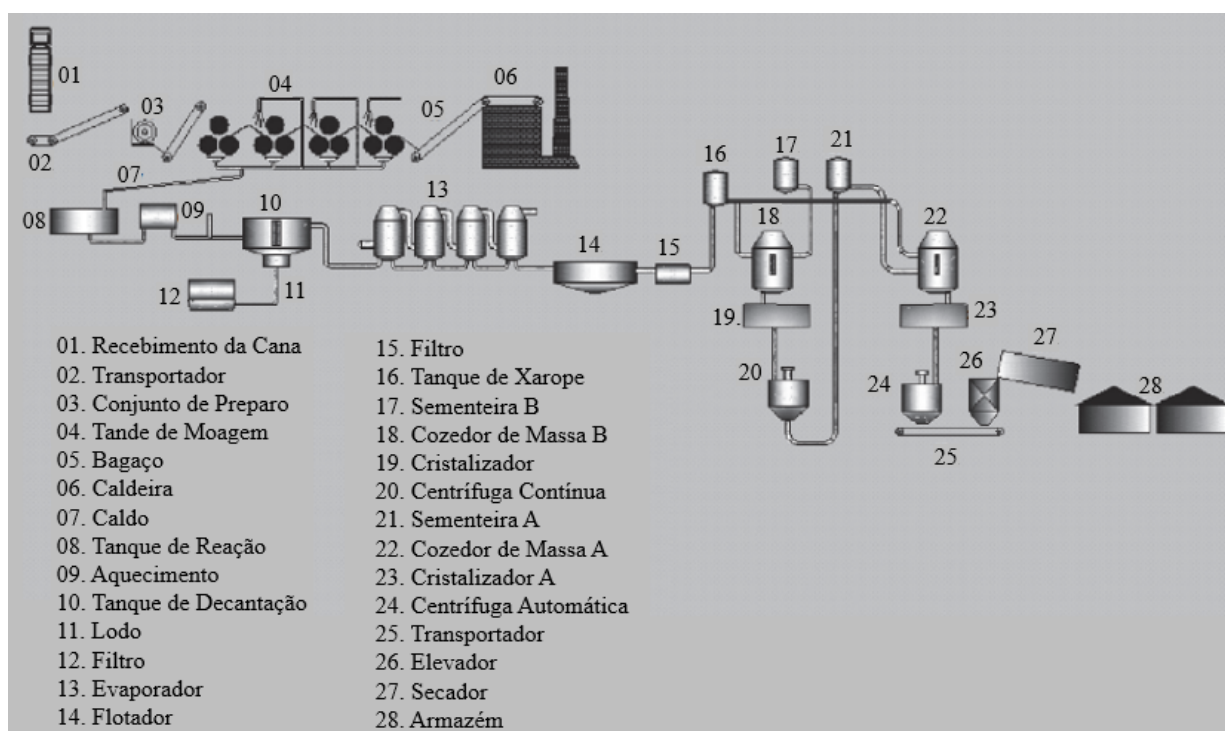
empregado para fabricação de etanol, porém, com o emprego de tratamento adequado e alguns cuidados adicionais, ambos podem ser empregados na fabricação de açúcar.

Com o caldo de primeiro estágio peneirado, este é destinado ao tratamento para a fabricação do açúcar. O caldo de segundo estágio segue um outro caminho para a fabricação do etanol, o qual não será descrito neste trabalho devido a ênfase estar nas centrífugas para fabricação do açúcar e na geração de energia.

3.3 FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

O processo de fabricação de açúcar visa, de forma simplificada, à obtenção da sacarose contida na cana, onde após a extração do caldo o açúcar é obtido com a total eliminação da água e a cristalização da sacarose, culminando nos vários tipos de açúcares conhecidos. A Figura 12 ilustra o processo de fabricação de açúcar de forma detalhada, desde o recebimento da cana até a estocagem do açúcar.

Figura 12 – Processo produtivo do açúcar.



Fonte: (SILVA, 2008).

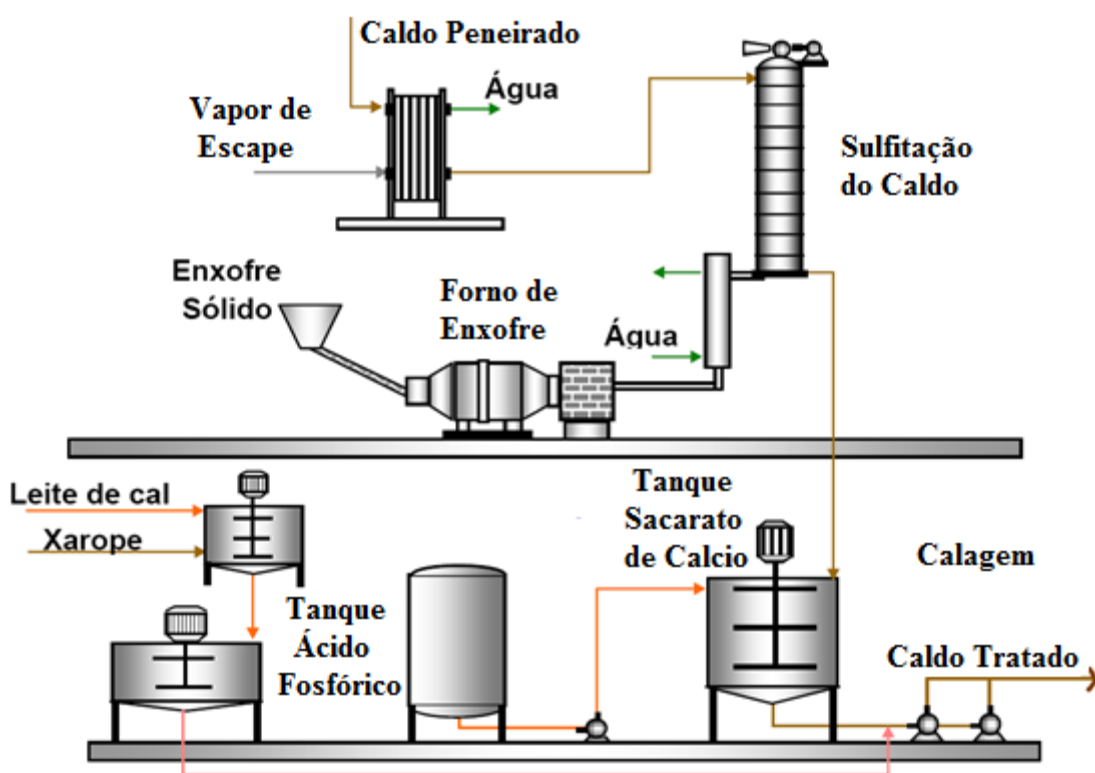
Dentro desse processo de fabricação, podemos classificar uma usina de açúcar como uma indústria de extração, uma vez que o açúcar já é produzido pela natureza, através da cana, sendo ele somente concentrado no processo, nas suas várias modalidades. O processo de produção do

açúcar envolve especificamente etapas físicas e químicas. As etapas de produção de açúcar podem ser divididas de forma macro em: preparação ou tratamento do caldo, cozimento, cristalização, centrifugação e secagem.

3.3.1 Tratamento do Caldo

O tratamento químico do caldo é composto por cinco etapas: sulfitação, calagem, aquecimento, decantação e peneiramento estático. Conforme ilustra a Figura 13, após a recepção do caldo peneirado oriundo da moenda, este é levemente aquecido e, na sequência, sulfitado em uma coluna com o objetivo de melhorar a cor, que é uma das variáveis mais importantes no produto final; após sulfitado, o caldo é enviado a um tanque para ajustes de pH através da adição de cálcio. O vapor utilizado no processo é oriundo do escape das turbinas.

Figura 13 – Tratamento do caldo – Sulfitação e Calagem.



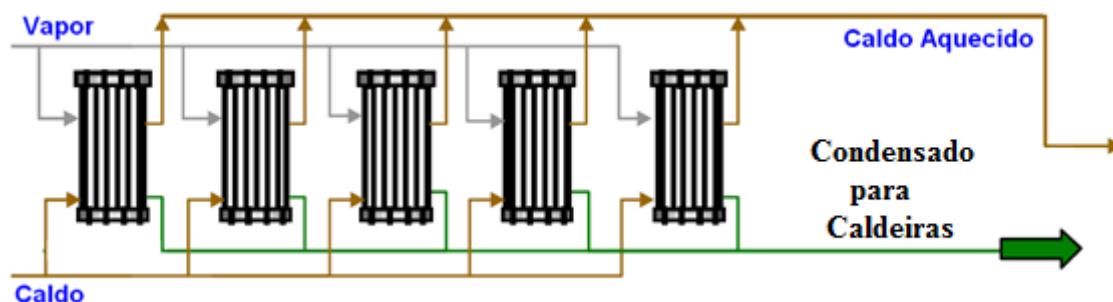
Fonte: (UDOP, 2016).

Após tratado quimicamente o caldo precisa ser aquecido, para ganho de viscosidade e densidade, bem como para permitir a aceleração das reações químicas. Para isso são empregados equipamentos denominados aquecedores. A Figura 14 ilustra uma instalação típica

de aquecedores dispostos em baterias paralelas, sendo que sua quantidade depende diretamente do volume a ser processado bem como da capacidade dos aquecedores instalados. O vapor de escape da turbina é o elemento para aquecimento do caldo.

Com o caldo aquecido a uma temperatura entre 100 e 120°C, este é enviado ao clarificador ou decantador, no qual se adiciona polímero com o objetivo de facilitar a floculação das impurezas para que estas sejam decantadas. Conforme ilustrado na Figura 15, a saída do lodo é feita pela parte inferior do decantador. Este lodo é enviado à área de filtragem para recuperação da sacarose que é arrastada na decantação, sendo que o restante deste material, denominado de torta, é utilizado como fertilizante.

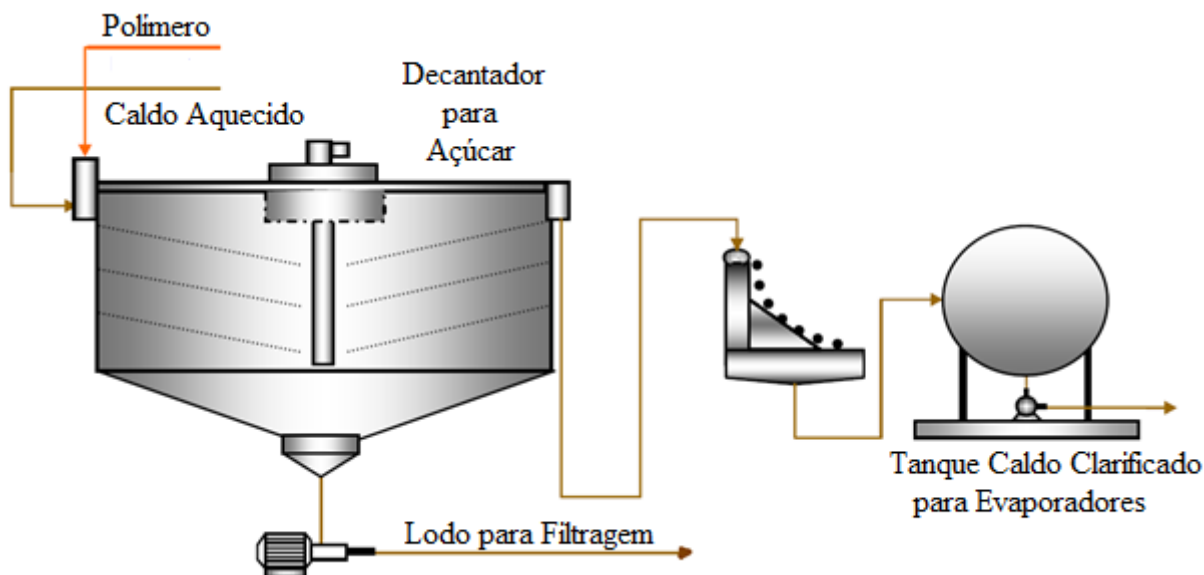
Figura 14 – Tratamento do caldo – Aquecimento.



Fonte: (UDOP, 2016).

O caldo decantado é encaminhado por tubulações até um equipamento denominado de peneira estática, a qual tem por função separar os sólidos mais leves que ficaram acomodados na parte superior do decantador, tais como os bagacilhos oriundos da moagem. Nesta etapa do processo os sólidos ficam retidos na parte superior da peneira estática, enquanto o caldo decantado passa pela tela e é armazenado em um tanque para posteriormente ser enviado ao setor de evaporação.

Figura 15 – Tratamento do caldo – Decantação e Peneiramento Estático.

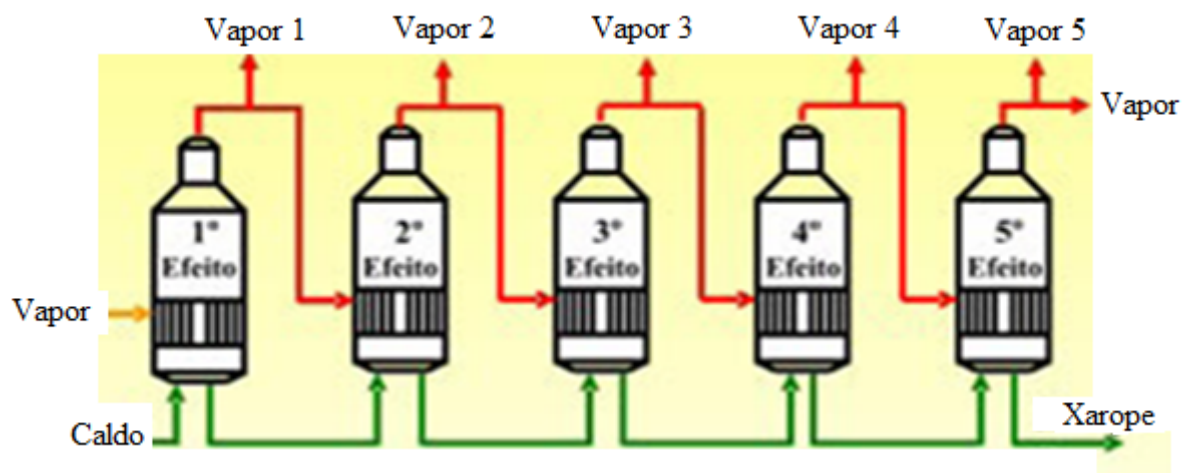


Fonte: (UDOP, 2016).

3.3.2 Evaporação

Constitui o primeiro estágio de concentração do caldo tratado. O caldo tratado contém cerca de 85% de água, que é então evaporada até que se atinja 40% em água, tornando-se um xarope grosso e amarelado. É fundamental a evaporação correta com o melhor aproveitamento térmico possível. Porém, isso só é possível graças ao emprego da configuração de múltiplo efeito. Conforme ilustrado na Figura 16, esta configuração é composta normalmente entre 4 e 5 evaporadores onde o caldo vai percorrendo os evaporadores sucessivamente, fazendo a troca térmica por convecção forçada diretamente com o vapor, onde retira-se praticamente 75% de toda a água contida no caldo. Além disso, com exceção do primeiro estágio, todos os demais são supridos com o vapor do efeito anterior permitindo um alto aproveitamento energético, além de suprir toda a necessidade de vapor vegetal tanto dos aquecedores anteriores quanto dos cozedores na sequência do processo.

Figura 16 - Evaporadores – Múltiplo Efeito.



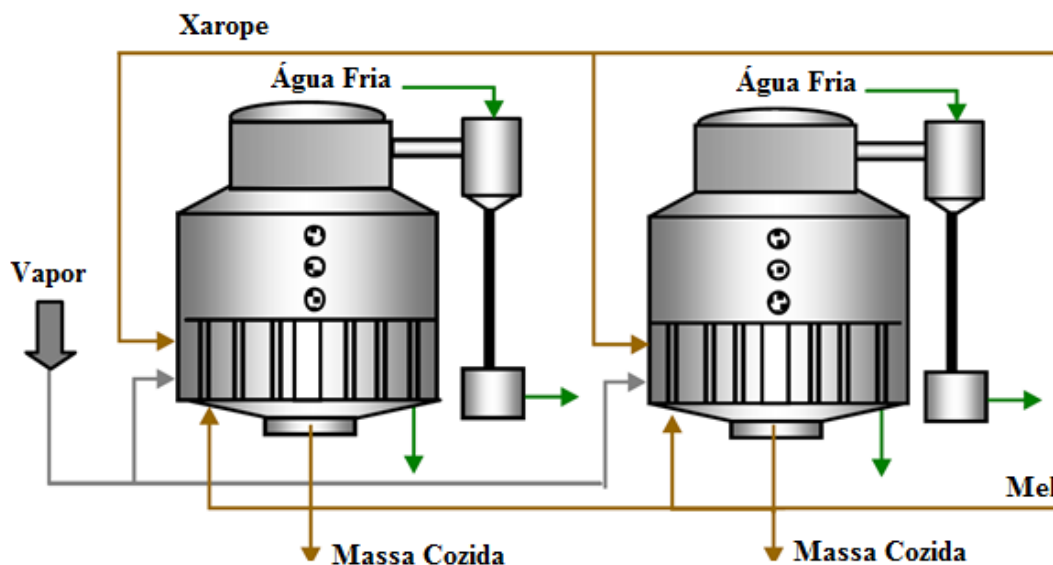
Fonte: (DEDINI, 2016).

3.3.3 Cozimento

Após passar pelo processo de evaporação o caldo é chamado de xarope devido a sua elevada consistência, onde a partir de agora sua elevação de concentração começa a resultar no aparecimento de cristais, sendo que a constituição da massa passa de forma progressiva do estado líquido para um estado “meio-sólido, meio-líquido”. Devido à elevada consistência da massa, a partir deste momento não é mais possível “fervê-la” em tubos longos e estreitos e nem fazê-la circular de um corpo a outro. Por isso, se faz necessário o emprego de uma evaporação de simples efeito denominado de cozedor conforme ilustra a Figura 17.

O processo de cozimento de açúcar é uma das etapas mais críticas para a produção de açúcar em termos de volume de produção e qualidade final do produto. Durante muitas décadas este processo foi conduzido por operadores em caráter quase artesanal, sendo dependente da experiência e sensibilidade destes operadores. O cozimento se realizava através de intervenções humanas constantes em busca do resultado desejado (GALLO e MARTINS, 2012).

Figura 17 – Cozedores.

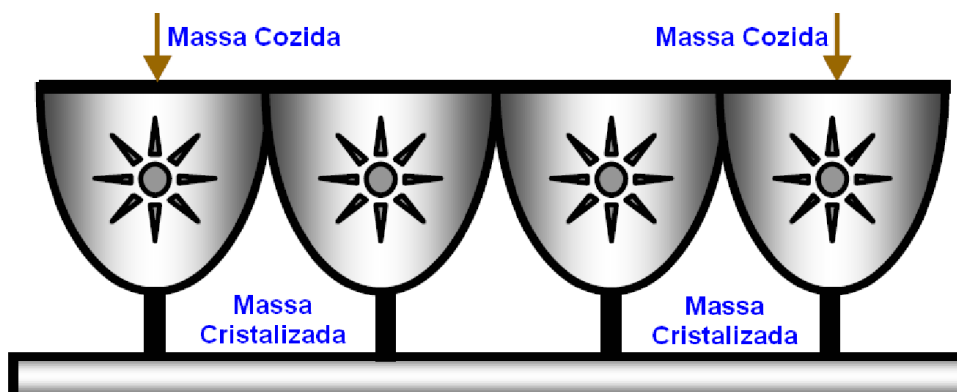


Fonte: (UDOP, 2016).

3.3.4 Cristalização

Após cozida, a massa encontra-se em um estado super saturado, ou seja, quente e com os cristais de açúcar imersos em mel. Neste ponto do processo, como esta massa cozida é muito densa e o mel muito viscoso, se a massa ficar em repouso a cristalização (crescimento dos cristais de açúcar) será interrompida. A solução é a utilização de um equipamento que possibilita a agitação da massa, possibilitando assim constantes modificações das posições das partículas. Este processo conhecido como cristalização e o equipamento responsável por esta ação é denominado Cristalizador, ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Cristalizadores.

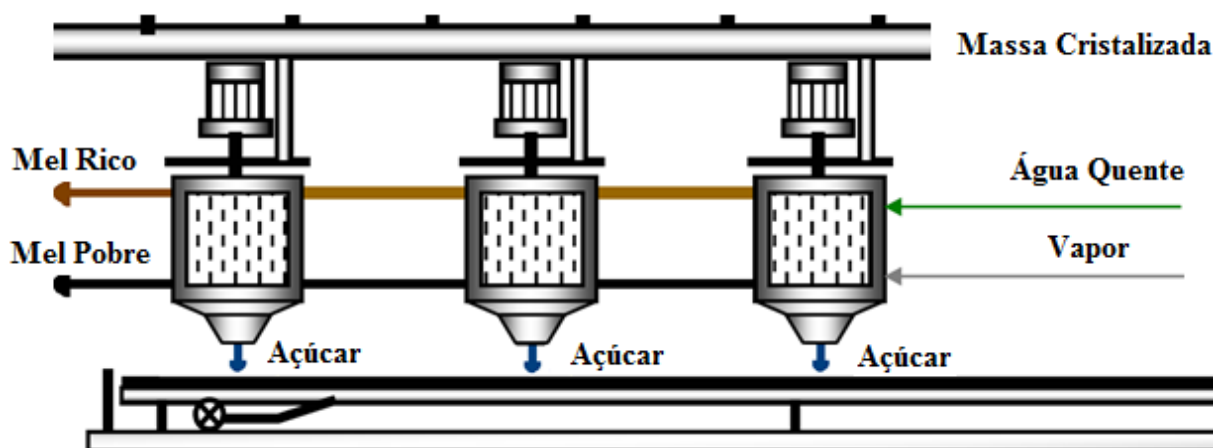


Fonte: (UDOP, 2016).

3.3.5 Centrifugação

Após o esgotamento de praticamente todo o licor mãe, é necessário separá-lo dos cristais; este processo só é possível por meio da centrifugação. O processo de centrifugação da massa “A” é comumente executado por equipamentos denominados centrífugas de batelada, as quais operam em ciclos repetitivos carregando, processando e descarregando o produto, onde, por força centrífuga, é feita a separação entre o cristal e o mel, sendo que após o final do ciclo o cristal permanece no interior do cesto sendo descarregado e enviado ao secador. Já o mel extraído durante o processo de centrifugação é enviado para recuperação. A Figura 19 ilustra a instalação de três centrífugas tipo batelada.

Figura 19 – Centrifugação.



Fonte: (UDOP, 2016).

Segundo Korsch (1978), uma centrífuga de batelada para processamento de açúcar é constituída por um conjunto rotativo vertical acionado por um motor elétrico. Estas centrífugas são equipamentos utilizados na fabricação de açúcar, com funcionamento por bateladas (ciclos), onde a máquina recebe a matéria-prima denominada de massa cristalizada e por força centrífuga faz a separação entre o mel e os cristais; o mel retorna algumas etapas atrás no processo para reaproveitamento, enquanto os cristais formam o açúcar que depois de centrifugado precisa apenas de uma rápida secagem para estar pronto para o consumo.

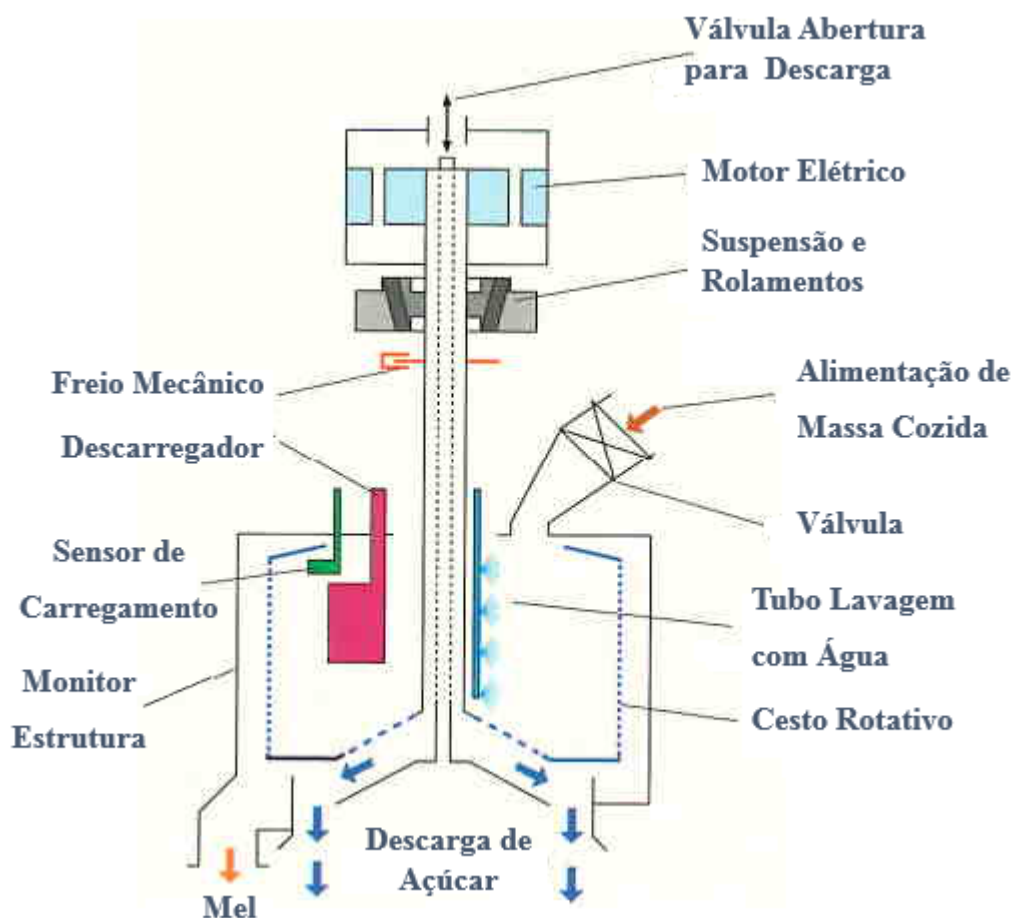
A Figura 20 ilustra o diagrama esquemático de uma centrífuga de batelada com suas características principais. O cesto é um tambor com diâmetro de 1,2 a 1,8m, com uma grande quantidade de furos que medem de 3 a 6mm de diâmetro perfurados na seção cilíndrica para permitir a passagem do líquido. O cesto é equipado com uma tela fina, que mantém os cristais de açúcar retidos em seu interior. Existe também uma tela de apoio atrás da tela fina, para

auxiliar a drenagem do licor mãe. O fundo do cesto tem uma válvula que é mantida fechada durante o enchimento e que é aberta no final de cada ciclo para permitir que o açúcar caia em um transportador na parte inferior da máquina. O açúcar é normalmente raspado para fora da tela com um descarregador, que fica retraído a maior parte do ciclo e entra em operação apenas na fase de descarga (REIN, 2007).

O eixo de transmissão se estende desde o fundo do cesto até um motor elétrico montado na parte superior da máquina, que aciona o conjunto rotativo. Estes motores são da ordem de 100 a 500 kW e têm de acelerar e desacelerar uma grande carga em um curto período de tempo. Cada ciclo leva cerca de três minutos, desde o carregamento da massa na máquina, aceleração para centrifugação, centrifugação, desaceleração para descarga até o descarregamento do açúcar. O cesto é equipado com sprays de água para lavagem do açúcar (REIN, 2007).

O conjunto rotativo é montado em amortecedores de borracha para absorver a vibração como resultado de carregamentos desbalanceados de massa no cesto. Devido às altas velocidades, mais de 1000 rpm, a operação com desequilíbrio de carga pode gerar várias consequências graves. As máquinas são equipadas com sensores que detectam a vibração ou qualquer movimento lateral do conjunto giratório, desligando o motor no caso de graves desequilíbrios (REIN, 2007).

Figura 20 - Diagrama esquemático de uma centrífuga de batelada.

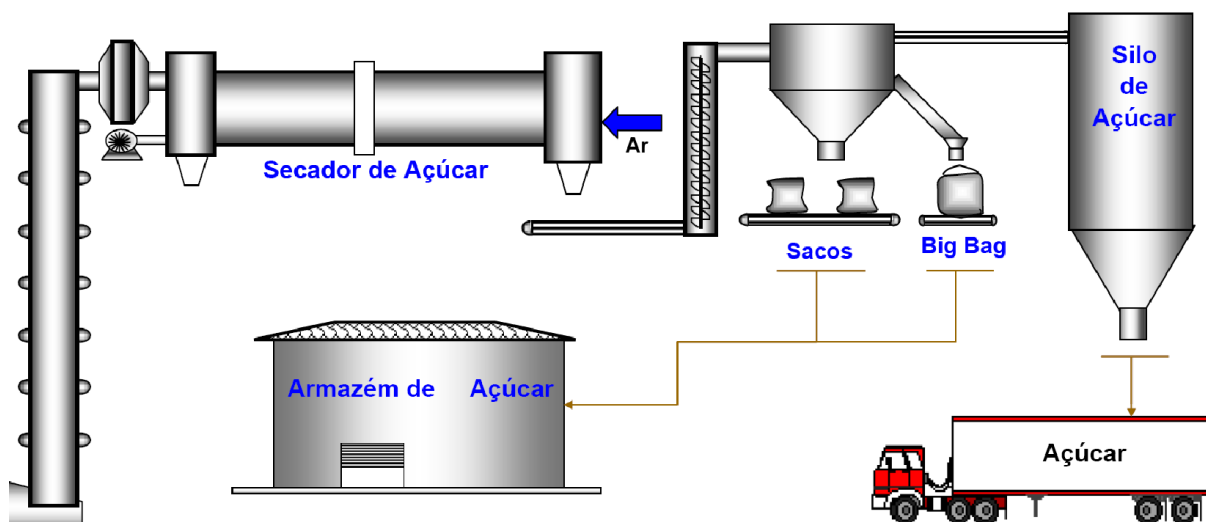


Fonte: (Adaptado de REIN, 2007).

3.3.6 Secagem

O açúcar obtido das centrífugas de batelada possui normalmente entre 0,5 a 1,5% de umidade; esta umidade pode trazer sérias implicações no armazenamento do açúcar. Para se corrigir este problema é empregado um equipamento denominado de secador de açúcar, que tem por finalidade tanto retirar a umidade do açúcar, bem como resfriar o açúcar para que este possa ser ensacado, armazenado e transportado. A Figura 21 ilustra a instalação de um secador de açúcar.

Figura 21 – Secagem, Armazenamento e Carregamento de Açúcar.



Fonte: (UDOP, 2016).

3.4 BIOMASSA

Entende-se como biomassa a matéria vegetal gerada pela fotossíntese e seus diversos produtos e subprodutos derivados, tais como: florestas, culturas e resíduos agrícolas (NASCIMENTO, 2012).

O termo biomassa engloba a matéria vegetal oriunda da fotossíntese e os seus derivados, tais como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos, municipais, entre outros. Estes materiais contêm energia química provinda da transformação energética da radiação solar. Essa energia química pode ser liberada diretamente por combustão ou pode ser convertida, através de outros processos, em fontes energéticas mais adequadas. Ao contrário das fontes fósseis de energia, como o petróleo e o carvão mineral, a biomassa é renovável em curto intervalo de tempo. A renovação da biomassa ocorre através da decomposição ou da queima de matéria orgânica, provocando a liberação de gás carbônico na atmosfera. As plantas, através da fotossíntese, transformam o gás carbônico e a água em hidratos de carbono, liberando oxigênio. Dessa forma, o uso adequado da biomassa não altera a composição média da atmosfera ao longo do tempo (KIMURA et al., 2010).

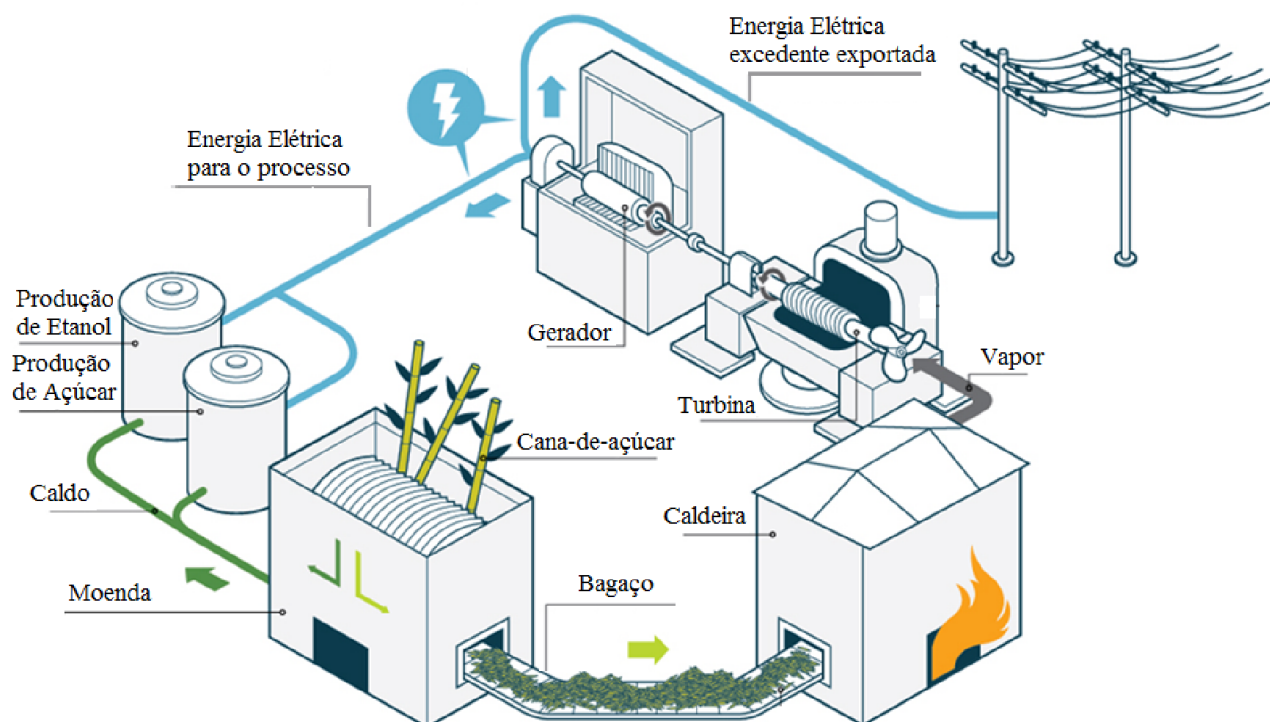
A disponibilidade de biomassa derivada da agroindústria brasileira é grande. Por exemplo, há consideráveis quantidades de bagaço e palha a partir da produção de etanol e a partir da cana-de-açúcar (LORA; ANDRADE, 2009).

A quantidade de biomassa produzida por unidade de área para a cana-de-açúcar é significativamente superior a qualquer outro vegetal, seja ele cultivado ou não como biomassa energética. Também a quantidade de biocombustível produzida por unidade de área, dentro dos limites das tecnologias atuais é bastante superior a de qualquer outra cultura. Uma das consequências importantes dessa característica é a contribuição para o menor custo da produção devido à menor extensão de terra para produção. O Brasil pode, portanto, prover para a humanidade um combustível limpo e renovável para a substituição de combustíveis fósseis, contribuindo assim para o combate ao aquecimento global de maneira decisiva, tendo como benefício colateral, o próprio desenvolvimento econômico (LEITE, 2007).

O pioneirismo do Brasil neste assunto tem proporcionado uma crescente visibilidade para os produtos brasileiros no mercado internacional, principalmente com uma preocupação maior com o aquecimento global e o aumento da demanda por energias renováveis. Desta forma, a agroindústria brasileira da cana tem enfrentado uma grande mudança organizacional. Aspectos de gestão nesta indústria estão mudando devido à importância de seus produtos, especialmente o etanol e a eletricidade, que crescem em nível nacional e internacional (PAIVA e MORABITO, 2009; PAIVA e MORABITO, 2011).

No caso em estudo é feita a referência à biomassa da cana-de-açúcar como bagaço, ilustrado na Figura 22. O bagaço é a parcela sólida oriunda do esmagamento da cana; ao ser queimado na caldeira o bagaço gera o vapor utilizado no processo da planta e na produção de energia elétrica. A maior parcela do vapor gerado tem como prioridade atender às necessidades da própria planta (autoprodução). Dependendo da eficiência térmica da planta, a energia elétrica excedente gerada pode ser comercializada. A Figura 23 ilustra o bagaço pronto para ser enviado às caldeiras.

Figura 22 – Ilustração do processo de fabricação, açúcar, etanol e energia elétrica.



Fonte: (Adaptado de BRASIL [f], 2016).

Figura 23 – Bagaço oriundo da moagem da cana para envio as caldeiras.



Fonte: (UDOP, 2016).

3.5 COGERAÇÃO

Segundo o Dicionário de Terminologia Energética do CBCME⁴ (2001), o conceito de cogeração significa a produção simultânea e sequencial de duas ou mais utilidades, calor de processo e potência mecânica e (ou) elétrica, a partir da energia disponibilizada por um ou mais combustíveis.

De acordo com Walter (1994), cogeração é um vocábulo de origem norte-americana empregado desde a década de 70 para designar os processos de produção combinada de calor útil (vapor, água quente, água gelada, ar quente e frio) e potência (elétrica ou mecânica), com uso sequencial da energia liberada a partir da queima de uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico empregado (Rankine, Brayton ou Combinado). Em outras palavras, seria o aproveitamento de uma parcela de energia que teria de ser obrigatoriamente rejeitada prevista pela Segunda Lei da Termodinâmica, resultando em um aumento da eficiência global do ciclo (BALESTIERI, 2002).

As usinas do setor sucroalcooleiro podem ser consideradas empreendimentos de cogeração, pois a partir da queima de bagaço (fonte primária de energia), geram vapor, que será fornecido às turbinas, gerando potência mecânica (utilizada para acionamento de equipamentos como bombas, moendas, desfibradores, entre outros) e potência elétrica para consumo interno ou fornecimento para a rede elétrica. O vapor extraído das turbinas, chamado de “vapor de escape”, é usado como reservatório térmico no processamento do caldo de cana (FIOMARI, 2004).

Pelo fato de serem obtidas potência térmica e potência mecânica utilizando uma mesma fonte de energia, os sistemas de cogeração tornam-se atrativos por apresentarem eficiências maiores do que aquelas encontradas quando ambas as formas de energia são produzidas em processos independentes. Estas eficiências podem ser da ordem de 75 a 90 % (WALTER, 1994).

Por um longo período não houve evolução significativa na indústria de processamento de cana-de-açúcar no Brasil. O processo era basicamente a extração do caldo da cana para fabricação do açúcar por meio da força humana e de animais. Com a revolução industrial nos séculos XVIII e XIX e com o advento da eletricidade entre o final do século XIX e início do século XX, foram implementados equipamentos movidos a vapor e a eletricidade, substituindo consideravelmente a força manual necessária até então. O vapor oriundo da queima do bagaço

⁴ ACBCME é o Comitê Brasileiro do Conselho Mundial de Energia.

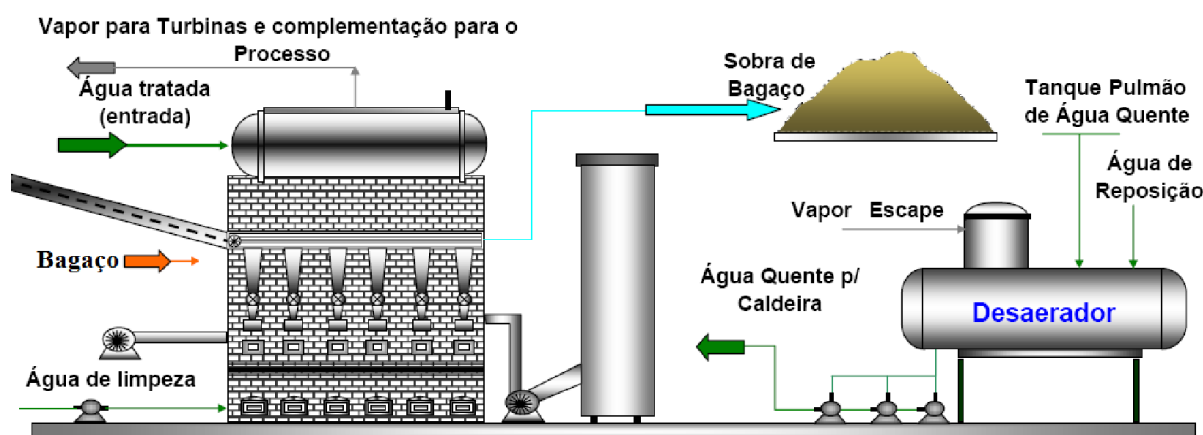
da cana era o responsável pelo processo de transformação térmica e pelo acionamento de parte dos equipamentos, incluindo a turbina a vapor que, acoplada a um gerador, era capaz de suprir a demanda de energia da planta.

A auto produção de energia elétrica era vista apenas como uma necessidade para se suprir a demanda da própria planta, devido principalmente a seu grande distanciamento dos centros de consumo, até que com a crise energética no final do século XX, o poder público buscou incentivar inicialmente a produção de etanol e, em seguida, a cogeração de energia elétrica nestas plantas.

No Brasil, as usinas de açúcar e etanol atingiram um estágio de autossuficiência em eletricidade e calor através da cogeração, não dependendo mais de combustíveis fósseis externos. Os excedentes de eletricidade são vendidos à rede pelos chamados autoprodutores, que possuem uma capacidade instalada da ordem de 500 MW, com um potencial de expansão dez vezes maior. A atividade foi impulsionada em 2002 pelo Programa de Incentivo às Fontes Renováveis de Energia, o PROINFA, que na sua primeira fase determinou a compra de 1100 MW de bioeletricidade para a rede nacional. Atualmente a produção de eletricidade é da ordem de 80 kWh por tonelada de cana; a melhor tecnologia disponível permite atingir 120k Wh/t cana (GOLDEMBERG et al., 2012).

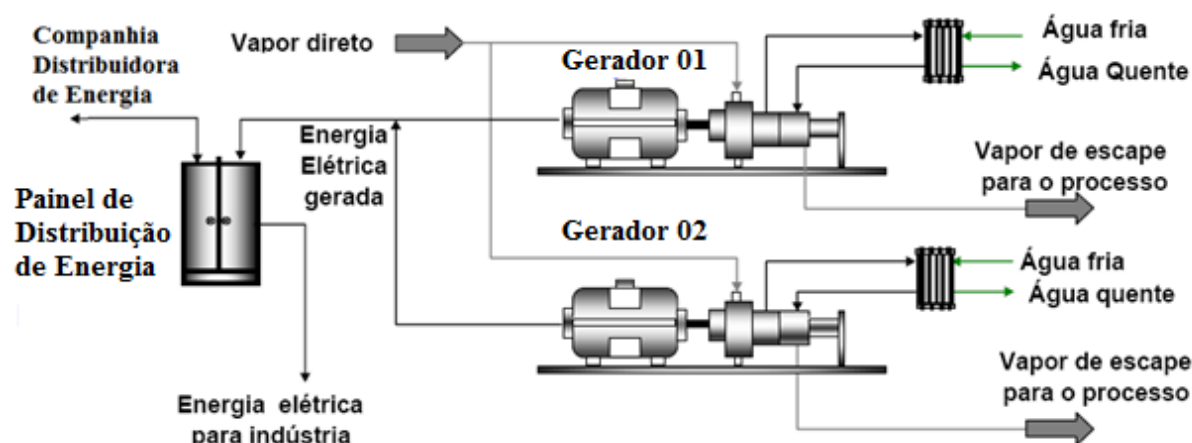
Em 2015, o setor sucroenergético brasileiro ofertou mais de 20 mil GWh para o Sistema Interligado Nacional (SIN). De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) e a Associação da Indústria de Cogeração de Energia (COGEN), esse volume de energia fornecido à rede pela biomassa da cana foi equivalente a economizar 14% da água dos reservatórios hidrelétricos do principal submercado do setor elétrico - Sudeste/Centro-Oeste, que, no ano passado, respondeu por 59% do consumo de eletricidade no País. As Figuras 24 e 25 ilustram, respectivamente, o setor de caldeiras, onde o bagaço oriundo da moagem da cana é queimado para a geração de vapor e o setor de geração de energia elétrica, onde o vapor oriundo das caldeiras é utilizado para acionamento das turbinas que, acopladas aos geradores geram a energia elétrica para suprir a necessidade da planta e o excedente é comercializado ao sistema SIN.

Figura 24 – Setor de caldeiras, onde o bagaço oriundo é queimado para geração de vapor.



Fonte: (Adaptado de UDOP, 2016).

Figura 25 – Setor de Geração de Energia Elétrica



Fonte: (Adaptado de UDOP, 2016).

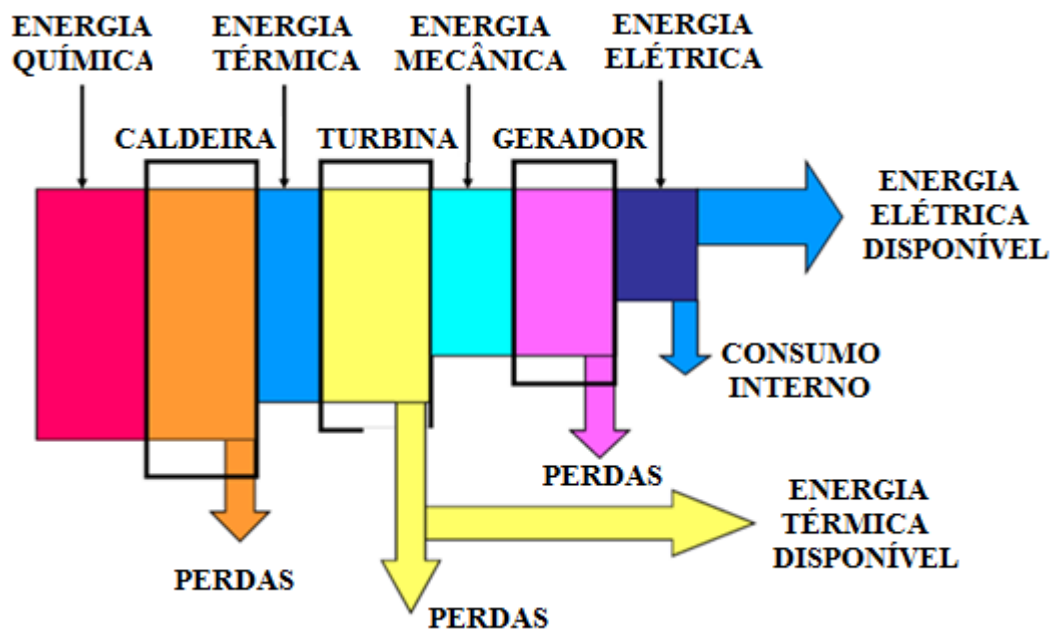
Vale lembrar que o objetivo principal das plantas de biomassa da cana de açúcar é sempre a oferta do vapor para processo, sendo a energia elétrica um produto secundário, primeiramente para suprir a própria demanda interna e, quando possível, possibilitando a venda de seus excedentes ao SIN. Importante destaque se dá aos benefícios ambientais possibilitados pela cogeração, como a redução de emissões de poluentes decorrentes da queima de combustíveis. Inicialmente, a cogeração foi uma solução adotada para indústrias distantes dos centros de consumo e, atualmente é utilizada em grande escala no mundo, inclusive com incentivos de governos e distribuidoras de energia.

Para uma planta em operação se tornar exportadora de energia elétrica excedente, primeiro é necessário que ela seja eficiente no uso interno da energia por ela gerada, ou seja, que tenha o mínimo possível de perdas, seja no uso do bagaço, na eficiência térmica da caldeira ou nos motores elétricos utilizados.

Nas usinas provenientes de antigos engenhos, onde tanto o vapor quanto a energia elétrica gerada atendia apenas à necessidade do consumo interno, a alta disponibilidade do bagaço da cana nunca trouxe preocupações, pois era considerado um subproduto do processo, sem valor agregado, cujas sobras eram descartadas como matéria orgânica. A partir da possibilidade de se comercializar energia, o bagaço passou a ser um combustível que merecia atenção especial, para garantir a energia necessária para a planta e a energia a ser exportada. A mesma atenção foi dada aos equipamentos, que consumiam grandes quantidades de vapor e de energia elétrica.

A figura 26, ilustra o fluxo de energia de uma central térmica para cogeração, onde a energia química é o bagaço, a energia térmica é o vapor, a energia mecânica é a potência na ponta de eixo da turbina e a energia elétrica é a eletricidade gerada pelo gerador.

Figura 26 – Fluxo de energia de uma central térmica de cogeração de uma usina sucroalcooleira.



Fonte: (AZZOLINI, 2007).

4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo a EPE (2015), eficiência energética é a relação entre a quantidade de energia final utilizada e o bem ou serviço que ela produziu. Hordeski (2005) afirma que o termo “eficiência” descreve a capacidade de equipamentos que operam em ciclos ou de processos produzirem os resultados esperados. Em uma visão física, o conceito de “eficiência” estaria limitado aos processos em que há conversão de energia e em que as formas inicial e final são visíveis ou perceptíveis, sendo estas, energia cinética, potencial e elétrica.

De acordo com Jannuzzi (2001), a redução do uso de energia nos processos produtivos ou em sistemas que proporcionam conforto e amenidades não é um fim em si mesmo. Na realidade, o uso eficiente de energia está estritamente relacionado com a consecução de importantes objetivos mais abrangentes e de interesse da sociedade, como, por exemplo: contribuir para aumentar a confiabilidade do sistema elétrico, reduzir ou postergar as necessidades de investimentos em geração, transmissão e distribuição, reduzir impactos ambientais (locais e globais) especialmente relacionados com a produção de eletricidade, reduzir custos de energia para o consumidor final.

A Lei nº 10.295/2001, conhecida como Lei da Eficiência Energética representa o marco regulatório da eficiência energética no país. Ela dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional da energia, visando a alocação eficiente dos recursos energéticos e a preservação do meio ambiente. Prevê ainda que cabe ao Poder Executivo estabelecer os níveis máximos de consumo específico de energia ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos fabricados ou comercializados no país, com base em indicadores técnicos pertinentes, que considerem a vida útil dos equipamentos.

As políticas públicas de eficiência energética estão inseridas no Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), lançado em 2007 pelo Ministério de Minas e Energia (MME), resultado de estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que analisam e apresentam sugestões para as mais diversas questões do setor. No que diz respeito à eficiência energética, o plano prevê que, até 2030, o país chegue a uma redução de 10% no consumo de energia. Mais recentemente, foi lançado o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), que hoje é a principal política sobre o tema e busca reunir e coordenar as mais variadas ações de governo no sentido de atingir os objetivos do PNE em relação à melhoria constante da eficiência energética.

4.1 ADEQUAÇÕES PARA COGERAÇÃO

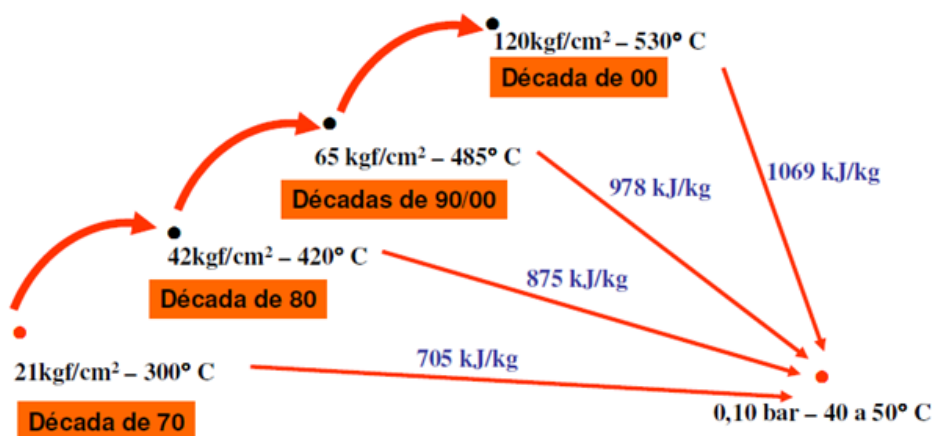
As usinas de açúcar e etanol do Brasil apresentam um grande potencial para geração de energia elétrica excedente através da cogeração. Entretanto, para que este potencial seja explorado em sua plenitude é necessário que ocorra nas usinas a implementação de tecnologias mais eficientes energeticamente. Tais implementações compreendem, entre outras a substituição e a adequação das caldeiras, a substituição das turbinas a vapor de simples para multi-estágio e a utilização de motores elétricos de melhor rendimento (PAZAN, 2004).

Para a cogeração são necessárias diversas ações. Dentre as principais podemos citar a adequação ou substituição das caldeiras, turbinas, geradores e seus periféricos de controle. No processo, os principais acionamentos da moenda e das centrífugas normalmente apresentam uma eficiência energética muito baixa, sendo o primeiro acionado por motores a vapor e o segundo acionado por motores multi-pólos.

4.1.1 Adequação das caldeiras

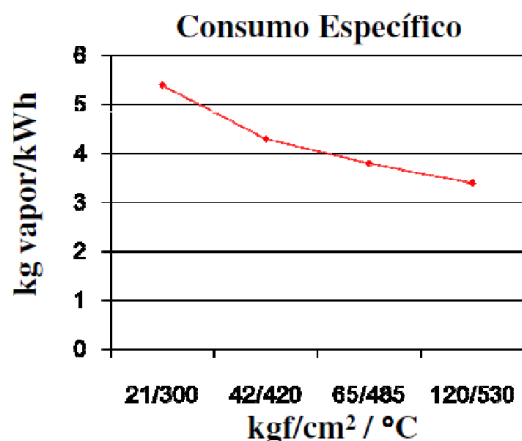
Em unidades não cogeradoras as caldeiras existentes são de baixa pressão e baixa temperatura ($21\text{kgf/cm}^2 - 300^\circ\text{C}$). Para que se tornem cogeradoras, estas caldeiras precisam ser adequadas ou substituídas, possibilitando um aproveitamento energético adequado. A Figura 27 ilustra a evolução das caldeiras e, na Figura 28, observa-se a eficiência do consumo do vapor por energia gerada, conforme incremento da pressão e da temperatura.

Figura 27 – Ganho energético com o aumento da pressão e da temperatura do vapor.



Fonte: (Adaptado de AZZOLINI, 2007).

Figura 28 – Relação entre eficiência energética e pressão-temperatura em caldeiras a vapor.



Fonte: (Adaptado de AZZOLINI, 2007).

4.1.2 Adequação da Casa de Força

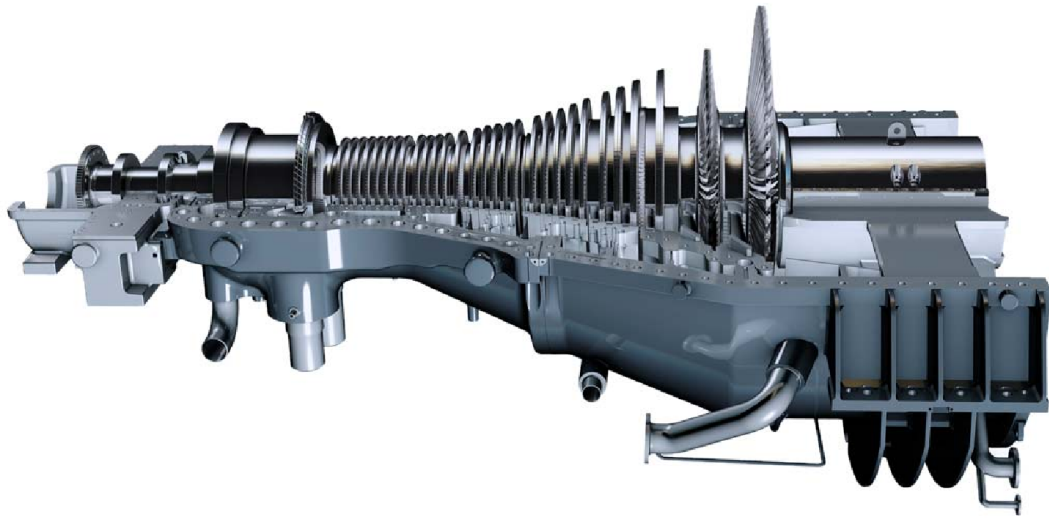
A Figura 29 ilustra uma instalação típica do conjunto turbina- gerador em uma casa de força; a Figura 30 ilustra a construção de uma turbina a vapor e a Figura 31 a construção de um gerador elétrico. Em usinas não cogeradoras para o sistema interligado nacional as máquinas instaladas normalmente não passam de 5MVA de potência elétrica gerada e em unidades cogeradoras temos máquinas de até 75MVA instaladas. A adequação da casa de máquinas com a aquisição de conjuntos turbina-gerador com maior capacidade de geração é peça fundamental para o aumento da geração de energia.

Figura 29 – Conjunto turbina gerador.



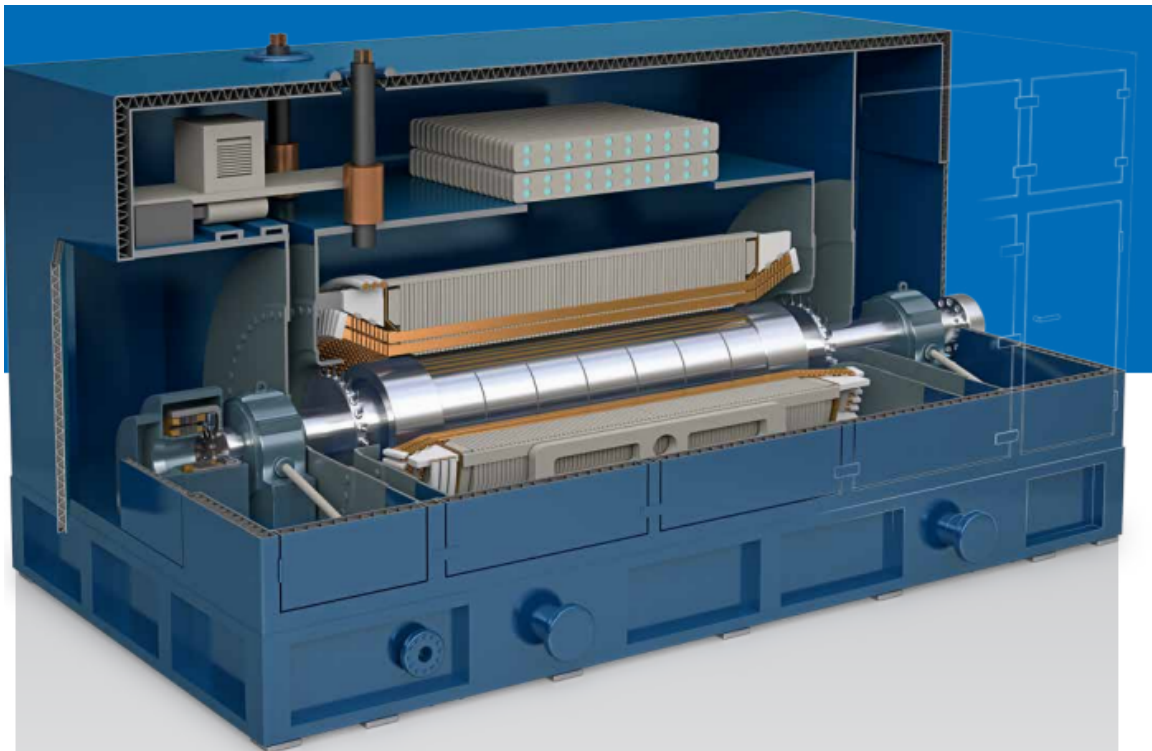
Fonte: (TGM, 2016).

Figura 30 – Turbina a Vapor da linha A200, até 220MW.



Fonte: (GE, 2016).

Figura 31 – Gerador Síncrono da linha TOPACK, até 120MVA em 60Hz.



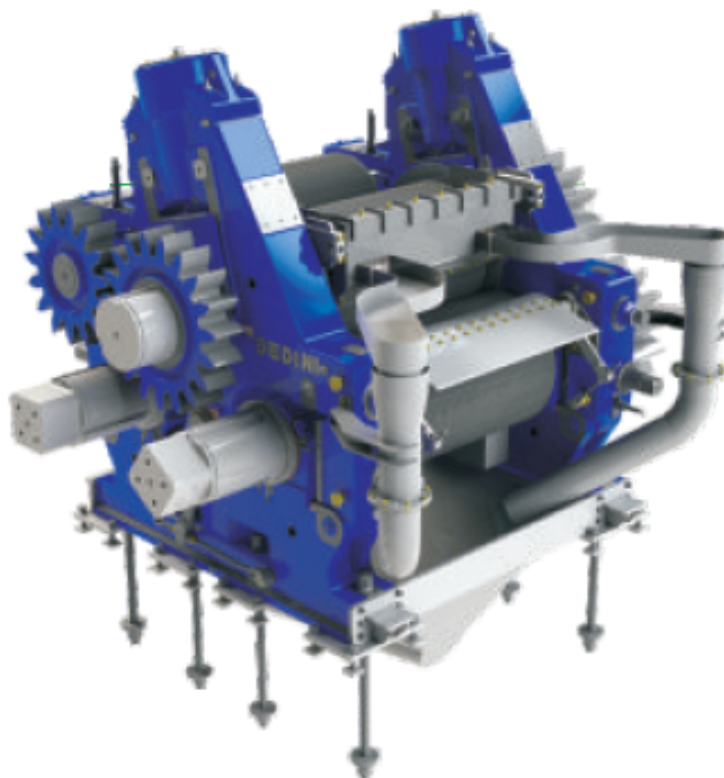
Fonte: (GE, 2016).

4.1.3 Adequação da Moenda

As moendas de cana, inicialmente eram de pequeno porte, acionadas por força animal. Posteriormente, em proporção muito maior, passaram a ser acionadas por motores a vapor, com potência de até 3000CV, porém com grande consumo e grandes perdas de vapor. A Figura 32 ilustra um terno de moenda e a Figura 33 uma moenda completa, acionada por motores a vapor.

Na análise da eficiência energética de uma planta sucroalcooleira, uma das ações mais representativas é a conversão dos acionamentos a vapor para acionamentos com motores elétricos de alta eficiência, com o propósito principal de reduzir o consumo de vapor no processo de moagem, proporcionando maior disponibilidade de vapor para a geração de eletricidade. Além disso, a substituição dos acionamentos a vapor por acionamentos elétricos nas moendas traz diversas vantagens, como: a maior produtividade (extração de caldo) devido à flexibilidade do ajuste das rotações, e a operação remota, que reduz os riscos com acidentes. A Figura 34 ilustra uma moenda moderna, com acionamento por motores elétrico- hidráulicos de alta eficiência.

Figura 32 – Terno de Moenda da linha MCD/01, até 1.400 TCH, 7 RPM.



Fonte: (DEDINI, 2016).

Figura 33 – Terno de Moenda com acionamento a vapor.



Fonte: (DEDINI, 2016).

Figura 34 – Tandén de Moenda da linha MCD/01, com acionamento eletro-hidráulico.



Fonte: (DEDINI, 2016).

4.1.4 Adequação das Centrífugas de Açúcar

As primeiras centrífugas de batelada eram movidas por motores de rotação constante, com descarregamento manual do açúcar. Depois, motores multi-pólos permitiam a variação da rotação para as diferentes fases (carregamento, centrifugação e descarga). Estes motores eram grandes consumidores de energia elétrica e demandavam manutenções constantes (REIN, 2007).

Com o advento dos motores de corrente contínua controlados por drives com tiristores, muitas centrífugas foram projetadas e instaladas com esta solução, que trouxe algumas vantagens construtivas, facilitando a operação e melhorando a eficiência energética. Entretanto, a solução em corrente contínua trouxe também muitos problemas de manutenção e indisponibilidade de máquinas (REIN, 2007).

As centrífugas atuais são acionadas por motores de indução de alto rendimento, acoplados a inversores regenerativos. Esta solução possibilita baixo consumo energético, alta produtividade e grande disponibilidade de máquina. O consumo de energia é baixo devido à qualidade do motor elétrico e, principalmente, à frenagem regenerativa efetuada pelo inversor. A frenagem regenerativa é quando o motor deixa de ser um consumidor de energia e passa a ser um gerador. O comportamento típico da potência e da rotação, para um ciclo de operação, é ilustrado na Tabela 3. O custo para aquisição aumenta conforme aumenta a eficiência de energia da solução proposta. Uma comparação da entrada de energia requerida e dos custos para aquisição dos diferentes tipos de acionamento é mostrada na Tabela 4 (REIN, 2007).

Tabela 3 – Análise de um ciclo típico de uma centrífuga de batelada.

	Tempo Típico (s)	Faixa de Tempo (s)	Faixa de Rotação (RPM)
Tempo aceleração para carga	6	4 - 12	
Carga	16	12 - 25	150 - 240
Aceleração para Centrifugação	50	30 - 100	
Centrifugação	24	5 - 40	1000 - 1500
Desaceleração	54	35 - 100	
Descarga	30	20 - 60	40 - 80
Duração Total	180	144 - 212	
Ciclos/hora	20	17 - 25	

Fonte: (REIN, 2007).

Tabela 4 – Consumo típico e diferença de custos de inversores para centrífugas.

	Consumo de Energia em kWh/ tonelada de massa processada				Custo Relativo dos controles e motores
Ciclos/hora	25	20	15	10	100% 100% 108% 180% 215%
2-rotações, frenagem mecânica	1,7	2	2,3	2,6	
3-rotações, frenagem mecânica	1,5	1,7	1,9	2,2	
3-rotações, frenagem CC	1,6	1,8	2	2,3	
Inversor (diodo/Tiristor)	0,95	1,05	1,3	1,5	
Inversor (IGBT)	0,95	1,05	1,3	1,5	

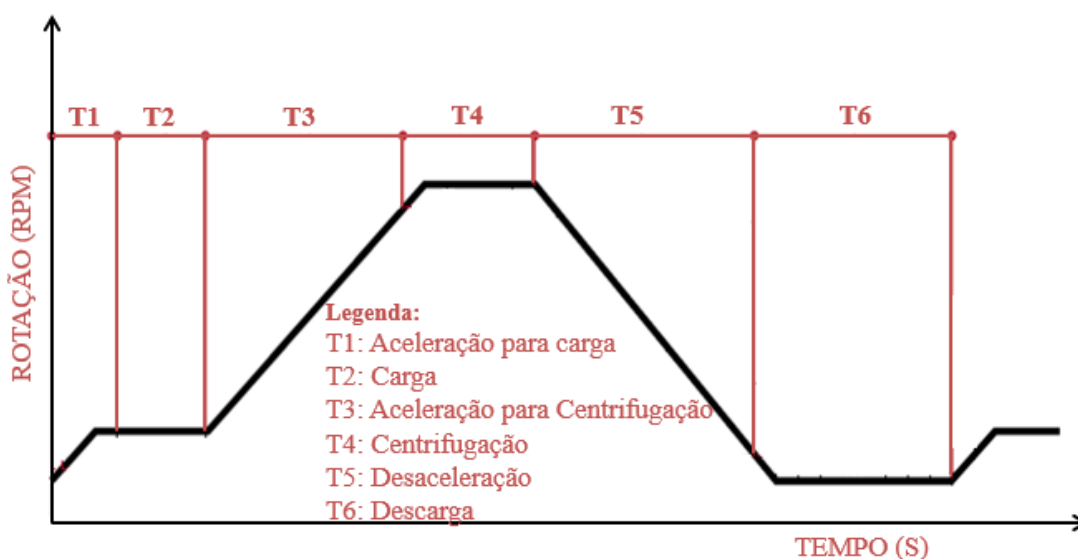
Fonte: (REIN, 2007. APUD: GRIM-WOOD et al. 2002).

5 CENTRÍFUGAS DE BATELADA REGENERATIVAS

5.1 CENTRÍFUGAS

O acionamento de uma centrífuga é feito por motores com enrolamento multi-polares, ou seja, motores com várias velocidades, comandados por um painel com contatores que, dependendo de cada etapa do ciclo de operação da máquina, seleciona o referido enrolamento do motor, variando assim de uma velocidade à outra. Como exemplo, um motor de 4/6/12/24 pólos teria respectivamente as rotações de 1800/1200/150/75 rpm. A Figura 35 ilustra um ciclo típico de uma centrífuga de batelada e a figura 36 ilustra um motor multi-pólos com dois ventiladores para ventilação forçada instalados em sua parte superior. Na Figura 37 observa-se uma instalação típica de três centrífugas, cada uma delas acionadas por um motor multi-pólos.

Figura 35 – Ciclo típico de uma centrífuga de batelada para fabricação de açúcar.



Fonte: (Adaptado de MAUSA, 2016).

Figura 36 – Motor multi-pólos de 150kW/380V - 4/6/12/24 Pólos, com dois ventiladores adicionais.



Fonte: (MAUSA, 2016).

Figura 37 – Instalação típica de centrífugas de batelada tipo V1000.



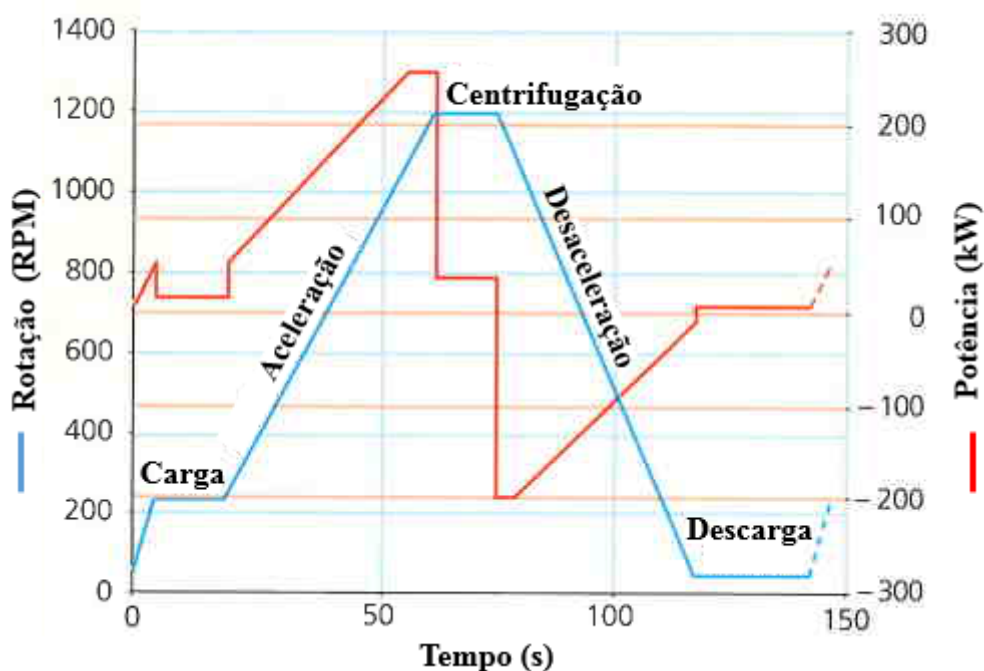
Fonte: (MAUSA, 2016).

Todas as tecnologias passam por três etapas ao longo do tempo (início, apogeu e fim) e, os motores elétricos também. No início, os motores eram fabricados com a preocupação central e o objetivo único de transformar energia elétrica em energia mecânica, sem olhar o consumo

de energia, o que hoje não pode acontecer. É necessário ter o menor consumo de energia nos processos de transformação e, para isso, é preciso evoluir em todos os sentidos (CLETO, 2012).

Nos dias atuais, o acionamento de uma centrífuga é feito por meio de um inversor regenerativo que, acoplado à rede de energia elétrica, é responsável pelo acionamento de um motor elétrico de indução. Quando na necessidade de aceleração da carga, o motor é capaz de acionar o conjunto rotativo da centrífuga, utilizando a energia fornecida pelo sistema elétrico. Porém, durante a desaceleração da carga, o motor passa a operar como um gerador, transformando a energia cinética gerada pela carga rotativa em energia elétrica; isto é possível devido à configuração do módulo regenerativo do inversor, que permite a devolução desta energia para a rede elétrica (KEEN et. al, 2016). A Figura 38 ilustra o ciclo típico de uma centrífuga de batelada com inversor regenerativo e mostra o comportamento da potência ao longo da variação da rotação durante um ciclo de operação.

Figura 38 – Ciclo típico de uma centrífuga de batelada com inversor regenerativo.



Fonte: (Adaptado de REIN, 2007).

É importante destacar também que houve significativa evolução da tecnologia de isolamento elétrica, o que possibilitou que motores de indução suportem ser operados continuamente com constante variação de rotação, sem apresentar sobreaquecimento.

Estas soluções em conjunto possibilitam um dos maiores incrementos no aproveitamento energético em uma planta de biomassa, por meio da substituição da antiga solução composta

de motores multi-polos controlados por contadores, para a implantação da solução composta por motores de indução de alto rendimento controlados por inversores regenerativos. A Figura 39 ilustra uma instalação típica de centrífugas modernas, automatizadas e acionadas por inversores de frequência regenerativos e motores de indução trifásicos enquanto a Figura 40 ilustra os detalhes construtivos.

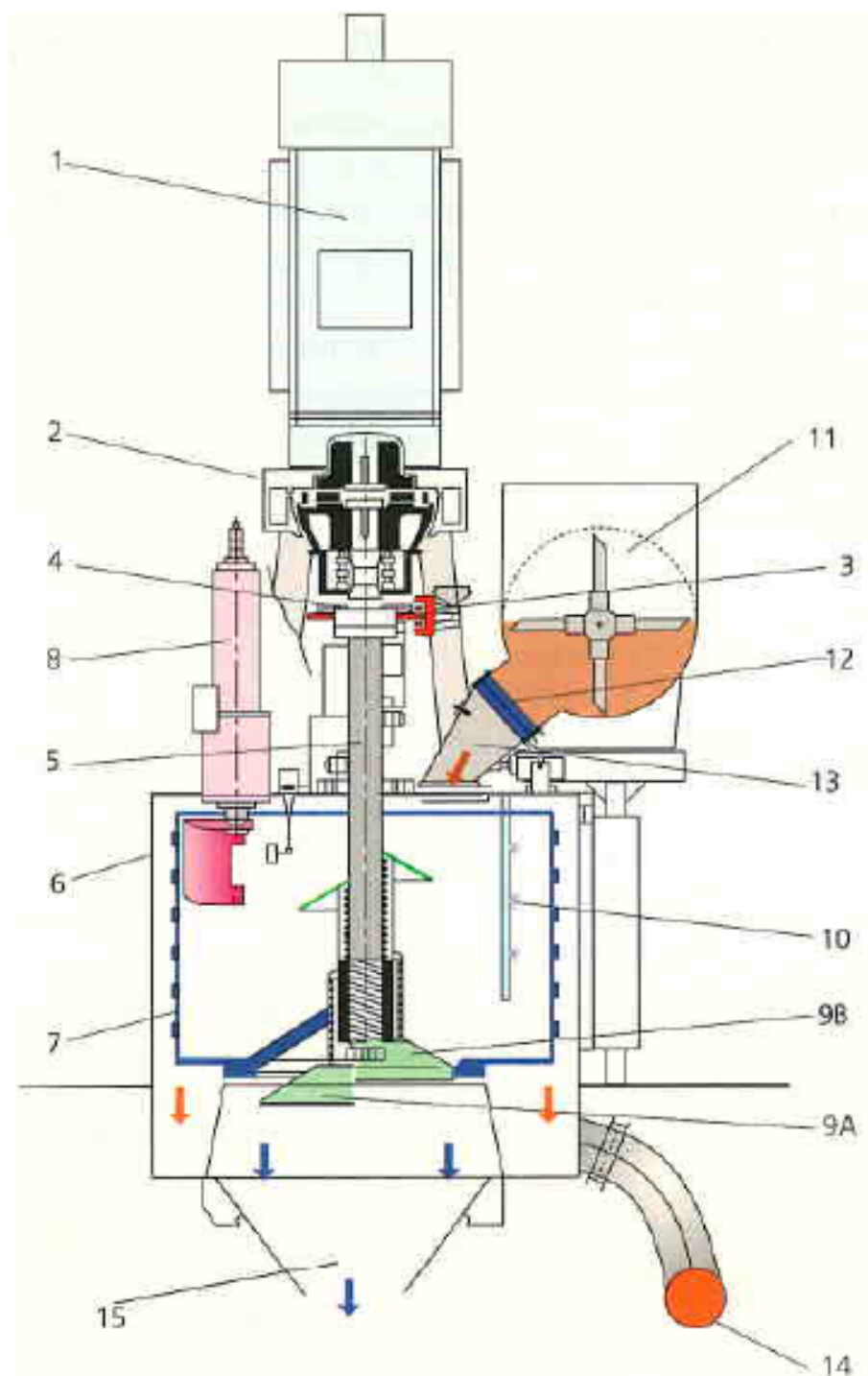
Segundo STIEGERT et al. (2012), por muitas décadas centrífugas foram absolutamente vitais para a produção de açúcar. No decorrer do tempo, sua concepção e características foram modificadas e atualizadas muitas vezes. Será que elas atingiram a fase final de desenvolvimento?

Figura 39 – Instalação típica de centrífugas de batelada tipo MAC1800MIL.



Fonte: (MAUSA, 2016).

Figura 40 – Detalhes construtivos de uma centrífuga de batelada.



Fonte: (REIN, 2007).

1 Motor; 2 Cabeçote; 3 Freio a disco; 4 Acoplamento Elástico; 5 Eixo; 6 Monitor; 7 Cesto; 8 Descarregador; 9 Abertura de Fundo; 10 Tubo Lavagem; 11 Melaceiro; 12 Válvula Alimentação; 13 Tubo Alimentação; 14 Saída de mel; 15 Saída de Açúcar

6 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ECONÔMICA DE UM CONJUNTO DE CENTRÍFUGAS DE BATELADA.

6.1 PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

6.1.1 Regeneração de Energia

A frenagem de um motor elétrico pode ser feita com freios mecânicos ou através de frenagem elétrica. As técnicas de frenagem elétrica necessitam de pouquíssima manutenção, são eficientes e garantem a precisão da parada durante a operação do motor, além de possibilitar a regeneração de energia. Os métodos de frenagem aplicados a motores de indução são: frenagem por contra-corrente, frenagem por corrente contínua, frenagem dinâmica ou reostática e frenagem regenerativa (EL-SHARKAWI, 2000).

A frenagem por contra-corrente pode ser obtida invertendo-se a sequência de fases do motor, o que resulta na inversão do sentido de giro; esta manobra é feita por meio de contadores eletromecânicos, resultando em um brusco momento de inércia no eixo do motor. A direção do campo magnético gerado pela circulação de corrente no enrolamento depende da sequência de ligação das fases nos terminais da máquina. A mudança nesta sequência provoca uma alteração no sentido de giro do campo magnético (OLIVEIRA, 2013).

Na frenagem por corrente contínua, aplica-se um campo magnético estacionário no entreferro através da injeção de corrente contínua nos enrolamentos de fases do motor. Ao aplicar uma tensão contínua nos terminais do primário do motor, um campo magnético estacionário e temporário será criado no entreferro. Quando o campo for atravessado pelo secundário induzirá corrente, fazendo com que as perdas no secundário aumentem. O aumento da potência dissipada no secundário diminui a energia cinética armazenada e a velocidade do motor (OLIVEIRA, 2013).

A frenagem dinâmica ou reostática tem por princípio converter a energia cinética gerada pela desaceleração e ou parada de uma carga ou veículo e dissipá-la em uma carga resistiva. Conceito muito utilizado em máquinas de movimentação como pontes rolantes e ou elevadores antes da invenção da frenagem regenerativa (OLIVEIRA, 2013).

A frenagem regenerativa recupera a energia gerada durante a frenagem de um veículo ou máquina. A recuperação da energia implica na devolução para a rede elétrica ou na armazenagem em banco de baterias, ultra capacitores, etc. Esta técnica de frenagem apresenta bons resultados quando aplicada a trens. Quando associada ao freio mecânico, a frenagem

elétrica reduz o desgaste das sapatas de freio e diminui a oscilação do torque em baixas velocidades (TAVARES et. al., 2010).

A frenagem regenerativa elétrica é derivada dos freios reostáticos, onde a energia gerada pelo movimento é transformada em calor, que é normalmente dissipado em bancos de resistores, ou os equipamentos precisam ser sobredimensionados para suportar esta dissipação. A tecnologia de regeneração permite que esta energia resultante de frenagens ou desacelerações sejam transformadas em energia elétrica ao invés de calor. Os primeiros relatos do emprego de algum sistema para regeneração de energia é de meados do século XX, em locomotivas e bondes movidos a diesel/eletricidade, tendo sido implantada pela primeira vez no ano de 1902 em bondes na cidade de Newcastle, Inglaterra. Em ambos os sistemas de frenagem os freios eram acoplados para atuarem como geradores.

A regeneração de energia ou frenagem regenerativa consiste na transformação da energia cinética em energia elétrica. A recuperação ou conversão de energia acontece durante a desaceleração de um veículo, a descida de um elevador de cargas ou a desaceleração de um motor elétrico. Essa energia pode ser imediatamente utilizada ou até mesmo armazenada. A frenagem regenerativa, além de contribuir para a redução do consumo de energia elétrica, evita o desgaste mecânico dos motores e freios, possibilitando assim um aumento da vida útil do sistema de frenagem por atrito, que no caso em questão é utilizado apenas em situação de emergência e falta de energia.

A regeneração é muito utilizada em veículos sobre trilhos como trolleys, trens, metrô e outros que, devido a sua grande inércia de parada, concentram uma quantidade significativa de energia cinética que pode ser dissipada em calor por meio de resistências elétricas ou convertida em energia elétrica por meio de conversores.

A energia regenerada durante a desaceleração, não tem um caminho definido e nem é direcionada a algum ponto de consumo ou armazenamento em específico, uma vez que não é possível direcioná-la. A energia se dilui no consumo total da planta, diminuindo assim a demanda da planta por mais energia elétrica. A exemplo de um motor mais eficiente, no caso da regeneração, o consumo médio passa a ser menor, então, se olharmos apenas para o interior da planta, o resultado seria que, devido a diminuição da demanda por energia, o gerador elétrico gera menos energia, consequentemente a turbina também passa a ter um consumo menor de vapor. Entretanto se considerarmos a possibilidade de aproveitamento desta energia excedente para comercialização, a diferença é que o gerador poderá trabalhar em sua capacidade nominal, assim como a turbina, exportando assim de forma segura seus excedentes ao SIN.

6.1.2 Variáveis do Dimensionamento

Das variáveis a serem apresentadas, as mais importantes são as potências ativa, aparente e reativa e o fator de potência. Os conceitos destas variáveis são definidas pela norma “IEEE Std 1459-2010 - Definições Padrão para a Medição de Quantidades de Energia Elétrica em Condições Senoidais, Não-senoidais, Equilibradas ou Desbalanceadas”, cujas definições básicas iniciais foram baseadas nos estudos desenvolvidos e acordados durante a década de 1940.

Essas definições serviam bem à indústria até pouco tempo atrás, enquanto as cargas eram lineares e permaneciam praticamente senoidais. Porém com a inclusão de equipamentos eletrônicos de potência como dispositivos de velocidades variáveis, retificadores controlados, conversores cíclicos, lâmpadas eletrônicas, fornos de indução e a representativa carga de computadores pessoais que proliferaram entre usuários comerciais e industriais, esta demanda passou a representar um expressivo incremento de cargas não lineares e não paramétricas ao sistema. Essas cargas têm o potencial de criar uma série de distúrbios para a rede elétrica e, conseqüentemente, para os outros equipamentos que compartilham esta mesma rede. Os principais problemas decorrem do fluxo de energia não ativa causado por correntes e tensões harmônicas (IEEE Std 1459, 2010).

6.1.2.1 Potência Ativa.

A energia fornecida para uma determinada instalação elétrica e que pode ser transformada em trabalho é denominada energia ativa. Seu cálculo é feito com base nos valores instantâneos de tensão e corrente ao longo do tempo, conforme equação (1) abaixo (IEEE Std 1459, 2010):

$$E_{ativa} = \int_0^t v i dt \quad (1)$$

Similarmente, vale a equação (2) para obtenção da potência ativa, aquela que pode ser convertida em outra forma de energia e efetivamente realiza trabalho (IEEE Std 1459, 2010):

$$P = \frac{1}{t} \int_0^t v i dt \quad (2)$$

No caso de a tensão e a corrente serem puramente senoidais (não conterem distorções harmônicas), a integral acima resulta na equação (3) (IEEE Std 1459, 2010):

$$P = VI\cos\varphi \quad (3)$$

Para um sistema trifásico puramente senoidal a potência ativa é definida conforme a equação (4) (IEEE Std 1459, 2010):

$$P = \sqrt{3} VI\cos\varphi \quad (4)$$

6.1.2.2 Potência Reativa

Em um sistema com corrente e tensão senoidais ocorre a presença de uma componente da potência relacionada com a circulação de energia entre as capacitâncias e indutâncias do circuito, sem contudo produzir trabalho. A essa componente oscilatória de valor médio nulo dá-se o nome de potência reativa (Q) e sua definição é dada pela equação (5) (IEEE Std 1459, 2010):

$$Q = \sqrt{3} VI\sin\varphi \quad (5)$$

6.1.2.3 Potência Aparente

A potência aparente (S) é definida como a raiz da soma dos quadrados da potência ativa e reativa ou, alternativamente, como o produto entre os valores eficazes de tensão e corrente, respectivamente representadas pelas equações (6) e (7) (IEEE Std 1459, 2010):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{3} VI \quad (7)$$

6.1.2.4 Fator de Potência

Com base nessas definições para correntes e tensões senoidais, o fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a aparente, conforme representado pela equação (8) (IEEE Std 1459, 2010):

$$\cos\varphi = FP = \frac{P}{S} \quad (8)$$

O fator de potência é uma boa medida da utilização da rede. Baixos valores do fator de potência indicam grande circulação de energia reativa, energia esta que não realiza trabalho útil e suas principais consequências são:

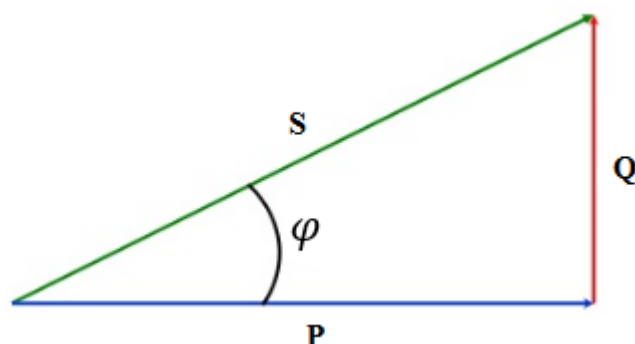
- a) Aumento das perdas na rede elétrica;
- b) Quedas e flutuações de tensão nas redes de distribuição;
- c) Limitação na capacidade dos condutores e equipamentos da rede.

Em geral, os equipamentos eletrônicos de medição registram, a uma dada taxa de amostragem, os valores de tensão e corrente da instalação. Com esses dados, calcula-se a potência ativa por meio da multiplicação de cada amostra de tensão por sua equivalente no sinal de corrente, conforme equação (9). Do mesmo modo, de posse desses valores amostrados de tensão e corrente, obtém-se o valor eficaz dessas grandezas e, pela multiplicação desses valores eficazes, consegue-se determinar a potência aparente conforme equação (7) (BRASIL [1], 2012).

$$P = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^T v[n]i[n] \quad (9)$$

Na técnica de medição em questão, de posse dos valores das potência ativa (P) e aparente (S), utiliza-se a relação entre as potências ativa (P), reativa (Q) e aparente (S), estabelecida em regime senoidal, para obtenção da componente da potência reativa. A Figura 41 ilustra a disposição das potências e do fator de potência dispostos na forma de um triângulo, que facilita o entendimento (BRASIL [1], 2012).

Figura 41 – Triângulos das Potências



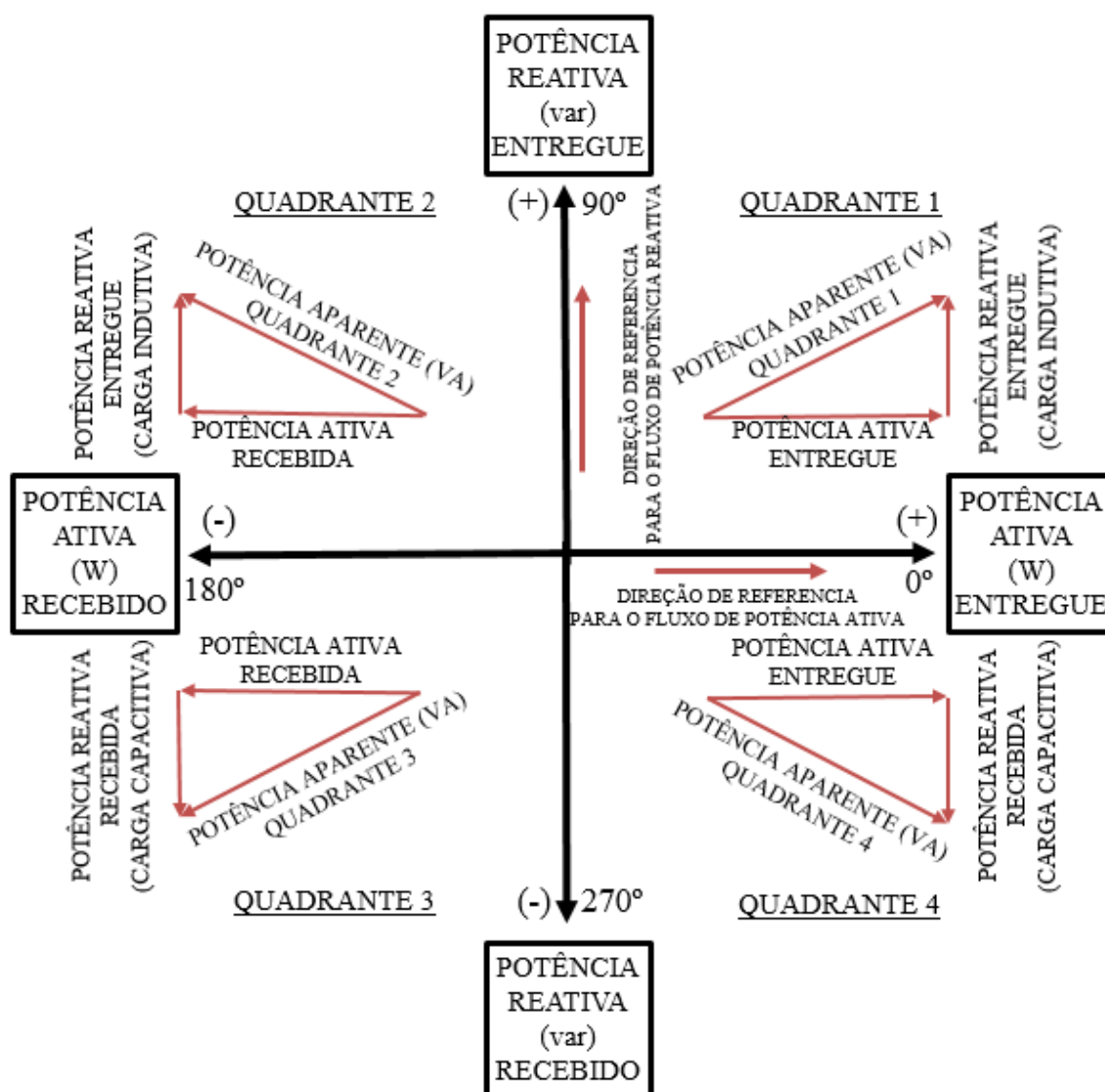
Fonte: (BRASIL [1], 2012).

O desafio das instalações elétricas, tanto na geração quanto no consumo, é manter o fator de potência ($\cos\varphi$) o mais próximo de 1, ou seja, com ângulo de defasagem entre (P) e (S) tendendo a zero. A condição de (P) igual a (S) significa que toda energia disponível está sendo utilizada para realização de trabalho.

Existem muitas perdas entre a usina geradora de energia até o consumidor final. O próprio gerador é uma máquina com enrolamento, composto por bobinas elétricas, que causam grandes efeitos indutivos na energia gerada, fazendo com que, o fator de potência tenha sempre uma característica indutiva na geração. Na transmissão, as linhas se comportam como um grande capacitor e acabam gerando um efeito contrário, ou seja, o efeito capacitivo. Isto faz com que seja necessário a inclusão de equipamentos ao longo das linhas de transmissão, ou nas próprias subestações de energia, para a correção do fator de potência.

Estes efeitos reativos, também são causados por equipamentos durante o consumo. Motores elétricos e sistemas de iluminação com reatores elétricos causam grandes efeitos indutivos no sistema, sendo necessário o estudo e a implantação de sistemas capacitivos, para correção do fator de potência dentro da própria indústria. A Figura 42 ilustra o comportamento em cada uma das situações.

Figura 42 – Fluxo de Direção das Potências nos Quatro-Quadrantes.



Fonte: (Adaptado de IEEE Std 1459, 2010)

6.1.2.5 Potência Média Consumida

O valor Eficaz ou RMS (Root Mean Square) que significa “A Raiz Quadrada da Média Quadrada”, consiste em um método estatístico desenvolvido por Fourier utilizado para calcular a magnitude de uma quantidade variável, onde qualquer sinal periódico pode ser decomposto em uma série de ondas senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental f , cada uma com uma determinada amplitude e uma determinada fase e uma componente contínua representando o nível CC caso haja. Estas ondas senoidais múltiplas inteiras, n , da

fundamental são chamadas harmônicos de ordem n ; são utilizados para a medição de corrente e tensão em sistemas elétricos. Através deles podemos obter a potência média consumida por um sistema ou equipamento; estas definições estão representadas pelas equações (10), (11) e (12), respectivamente, para corrente eficaz, tensão eficaz e potência média ($\Theta = 90^\circ$ para indutor e $\Theta = -90^\circ$ para capacitor).

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \quad (10)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (11)$$

$$P_{media} = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varphi - \theta) \quad (12)$$

6.1.2.6 Potência Regenerada

Conforme descrito anteriormente, a potência regenerada é a quantidade de energia devolvida para a rede elétrica da planta. Devido a operação cíclica da máquina, no momento de desaceleração da carga o motor passar a ser um gerador. A quantificação é dada pelo cálculo da potência média da solução, com e sem o recurso da regeneração.

6.1.2.7 Ciclos por Hora

É a definição da quantidade de ciclos idênticos e completos que a centrífuga e seu conjunto de acionamento, motor e inversor são capazes de executar em uma hora. As máquinas mais antigas efetuam no máximo 20 ciclos. Atualmente existem máquinas que executam até 24 ciclos.

6.2 ESTRUTURA DA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

6.2.1 Análise Produtiva e Energética

Em uma unidade industrial nova, a escolha da solução a ser adotada em termos de quantidade e capacidade das máquinas está ligada diretamente à necessidade de processamento da planta. Como o processo de fabricação do açúcar até chegar à etapa da centrifugação é contínuo, é preciso que todas as máquinas sempre estejam em funcionamento, ou ao menos disponíveis para tal. Por isso, o dimensionamento recomenda que sempre tenhamos uma máquina reserva para suprir a parada por manutenção de uma das máquinas.

Para o estudo em questão não é considerada a condição de uma nova unidade industrial, mas sim a substituição de máquinas antigas por novas, melhorando o desempenho energético e aumentando a produtividade. Por isso assume-se que a capacidade de determinada planta com as máquinas atualmente instaladas para o estudo da substituição.

As máquinas antigas tinham capacidade limitada a 1000 kg de carga por ciclo e de executar no máximo 20 ciclos por hora, enquanto máquinas modernas possuem capacidade de carga de 1300 a 2250 kg por ciclo e são capazes de executar até 24 ciclos por hora. As capacidades das máquinas modernas, nem sempre são múltiplas das capacidades das máquinas antigas, possibilitando assim, a oportunidade para uma capacidade de processamento. Com base nos registros coletados e com os dados das máquinas, aplica-se a equação (13) para determinação do consumo energético.

$$CE = \left(\frac{PE}{CMP * NC * NM} \right) \quad (13)$$

Sendo CE o consumo energético [kVAh/Tonelada de massa a ser processada], PE a potência eficaz ao longo do ciclo [kVA], CMP a capacidade de carga de massa a ser processada na máquina por ciclo [Toneladas], NC o número de ciclos, ou seja, a capacidade que a máquina tem de executar n ciclos em uma hora de trabalho [Ciclos/hora] e NM o número de máquinas em análise.

Para uma melhor comparação no estudo é necessário conhecermos também o consumo energético e a capacidade produtiva por safra. Para se conhecer o consumo energético aplica-se a equação (14), a produção por safra é determinada pela equação (15) e o rendimento energético por saca de açúcar produzida é determinado pela equação (16).

$$CENS = \left(\frac{CMP * NC * NM * Prms * 24 * 30 * 7}{1000000} \right) \quad (14)$$

$$PSNS = \left(\frac{CMP * NC * NM * PC * 24 * 30 * 7}{50} \right) \quad (15)$$

$$NPS = \left(\frac{CENS}{PSNS} \right) \quad (16)$$

Sendo *CENS* o consumo energético por safra [MVA/Safra], *Prms* a potência eficaz da máquina [kVA], 24 a quantidade de horas por dia, 30 a quantidade de dias por mês e 7 a quantidade média de meses de duração de uma safra. *PSNS* é a produtividade por safra [Sacas de 50kg/Safra], *PC* é a porcentagem de cristais contidos na massa, 50 é o peso de uma saca de açúcar. *NPS* é o rendimento energético global da safra [kVA/Saca de Açúcar]. A Tabela 5 ilustra as principais características e os dados produtivos das centrífugas automáticas do fabricante.

Tabela 5 – Dados Técnicos da Centrífugas Automáticas

Dados técnico						
Capacidade de carga por ciclo	Kg	1300	1500	1800	2000	2250
Volume do cesto	l	780	880	1090	1230	1380
Espessura de camada do produto	mm	225	225	230	205	235
Velocidade máxima	rpm	1200	1200	1200	1150	1150
Força G máxima	G	1060	1090	1080	1000	1000
Distância entre centros	mm	1750	1750	2300	2300	2300
Número máximo de ciclos	ciclos/h	28	28	28	28	28
Capacidade máxima de massa cozida	t/h	36	42	50	56	63
Potência do motor	kW	150	200	315	400	400

Fonte: (MAUSA, 2016).

6.2.2 Análise Econômica

As estimativas de custos para substituição de centrífugas de batelada antigas por centrífugas modernas se baseiam na produtividade, nas condições de processo, na eficiência energética e nos valores da commodity açúcar no mercado. O cálculo do ganho de produtividade na comparação entre a solução existente e a proposta é dado pela equação (17) e o ganho financeiro da mesma comparação é dado pela equação (18).

$$GS = (PSNS - PSSE) \quad (17)$$

$$GS(R\$) = [(VVSA) - \left(\left(\frac{CPSA}{1000} \right) * 50 \right) * GS] \quad (18)$$

Sendo GS o ganho de produtividade [sacas de açúcar por safra], $PSNS$ a produção por safra com a nova solução e $PSSE$ a produção por safra com a solução existente. $GS(R\$)$ é o ganho financeiro [milhares R\$ por safra], $VVSA$ é o valor de venda da saca de 50kg de açúcar produzida no mercado [R\$85,67, Fonte: CEPEA/ESALQ/USP em 06/08/2016], $CPSA$ é o custo da produção por saca de açúcar por tonelada [R\$723,56, Fonte: PECEGE/CNA/USP em 06/08/2016).

O cálculo da energia excedente por safra disponível para comercialização é dado pela equação (19) e a receita gerada pela venda da energia excedente por safra é dado pela equação (20).

$$EES = (CESE - CENS) \quad (19)$$

$$EES(R\$) = EES * CMW/h \quad (20)$$

Sendo EES o excedente de energia disponível pela centrífuga por safra [MVA/Safra], $CENS$ o consumo energético da nova solução proposta por safra e $CESE$ o consumo energético da solução existente por safra, $EES(R\$)$ o ganho financeiro com a venda da energia excedente [milhares R\$ por safra] e CMW/h o preço médio de venda da energia térmica, oriunda do bagaço da cana [R\$203,25/MWh, Fonte EPE, Leilão de 19/04/2016].

6.3 DESCRIÇÃO DA ANÁLISE PROPOSTA

A análise desenvolvida para este trabalho, foi feita com dados coletados diretamente em campo. Para a coleta dos dados elétricos foi utilizado um osciloscópio para as máquinas antigas e, um notebook com o software Starter Commissioning, no caso das máquinas modernas. Em função da impossibilidade de se coletar informações de várias máquinas trabalhando em conjunto, a coleta de dados foi feita em uma máquina de cada modelo.

Para ambos os casos, cujos dados foram coletados por meio de osciloscópio ou notebook, após a coleta os resultados foram convertidos para uma planilha excel, para que se possa gerar os gráficos e efetuar a análise quanto ao comportamento em termos de consumo de energia elétrica. A análise permite a comparação ímpar entre máquinas, ou seja de uma máquina por

outra, bem como a simulação de várias máquinas em operação defasadas em seu ciclo, cujo objetivo é determinar o valor ótimo para atendimento daquela necessidade de processo.

De posse dos resultados da performance energética é preciso analisar a eficiência produtiva da configuração proposta de equipamentos; para isso é preciso, além do número de máquinas, conhecer também os dados de processo, como a capacidade produtiva de cada máquina, a quantidade de ciclos por hora que cada tipo de máquina considerada é capaz de executar e a porcentagem média de cristais de açúcar contidos na massa a ser centrifugada.

A análise financeira é feita com base tanto na performance energética quanto na produtiva, levando em consideração as seguintes variáveis controladas pelo mercado: valor de venda da saca de açúcar, custo da produção da saca de açúcar por tonelada, valor estimado para aquisição de novas máquinas e valor de venda do Megawatt hora.

Após a efetivação de toda a sequência de simulação e cálculos, é possível tomar a decisão quanto à viabilidade do investimento do cenário ótimo encontrado, ou seja, qual tipo e quantas centrífugas devem ser aplicadas em determinada planta.

7 ESTUDO DE CASO

A simulação e a análise desenvolvida para este trabalho foram realizadas através de sua aplicação a um estudo de caso de duas usinas sucroalcooleiras reais, que atendessem às premissas básicas da pesquisa: valores de processo e consumo energético, uma unidade industrial que hoje se encontra com máquinas antigas e outra com máquinas novas já operando.

7.1 DESCRIÇÃO DAS USINAS SUCROALCOOLEIRAS ANALISADAS

Para o estudo de caso empregado neste trabalho foi considerada uma usina sucroalcooleira com máquinas antigas localizada no estado de São Paulo, este que possui atualmente 157 usinas em operação (NOVACANA, 2016), integrando a principal localização das usinas no país, com produção de açúcar direcionada tanto para o mercado interno quanto externo, produzindo tanto etanol anidro quanto hidratado e gerando energia elétrica oriunda do bagaço da cana apenas para consumo próprio, ou seja não conectado ao SIN. A unidade processa cerca de 5 milhões de toneladas de matéria prima por safra e a cana é cultivada em cerca de 50 mil hectares de terras ao seu redor.

A usina sucroalcooleira com máquinas modernas já implantadas é uma unidade construída recentemente e está localizada no estado do Mato Grosso do Sul, que teve uma forte expansão nas últimas décadas no cultivo da cana e, conseqüentemente, na produção de açúcar, etanol e energia elétrica. O estado possui atualmente 24 usinas em operação; esta planta se diferencia da anterior devido à capacidade produtiva ser muito maior, pelas modernas instalações e, principalmente, pelo fato de ser uma geradora de energia elétrica conectada ao SIN, comercializando seus excedentes produzidos.

As características principais para a análise da viabilidade e aumento da eficiência energética definidas nos estudos são: a quantidade de máquinas existentes atualmente na planta com as máquinas antigas, que é de 12 centrífugas tipo V1000, com capacidade de carga de 1000kg por ciclo e capacidade de executar 20 ciclos por hora, com acionamento por motor multi-polos de 150kW cada, com enrolamentos de 4, 6, 12 e 24 pólos e fator de potência médio de 0,65.

Para o caso da nova centrífuga que servirá como fator de comparação nos estudos, será considerada uma centrífuga tipo MAC1800MII com capacidade de carga de 1800kg por ciclo e capacidade de executar 24 ciclos por hora, com acionamento por inversor de frequência

regenerativo e motor de indução trifásico de 315kW cada, com fator de potência médio igual a 1, ou seja, toda energia disponível é transformada em trabalho.

7.2 DADOS DE ENTRADA E CENÁRIOS CONSIDERADOS NA ANÁLISE

Para todas as análises realizadas foram considerados os resultados de uma safra, ou seja, considerou-se que as máquinas trabalharão 24 horas por dia durante 7 meses. As paradas para manutenção e/ou falta de matéria-prima ou parada por chuva são consideradas compensadas pela existência de uma máquina reserva, em stand-by, disponível sempre para compensar a parada de qualquer uma das outras máquinas e/ou até mesmo trabalhar em conjunto com elas quando for solicitada pela demanda. O valor médio operacional adotado para as centrífugas modernas foi de 24 ciclos/hora.

Estes dados de entrada utilizados para iniciar a análise são mostrados de forma agrupada na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Dados de entrada⁵.

Centrífugas de Batelada		
Características	Existente	Proposta
Modelo	V1000	MAC1800MII
Capacidade de carga por ciclo (Kg)	1000	1800
Número máximo de ciclos/hora	20	24
Motor tipo	Multi-Pólos	MIT
Potência do motor (kW)	150	315
Número do pólos do motor	4/6/12/24	8
Acionamento do motor	Contatores	Inversor Regenerativo
Fator de potência médio	0,65	1
Porcentagem de cristais de açúcar na massa	0,43	0,43
Quantidade de máquinas existentes	18	?

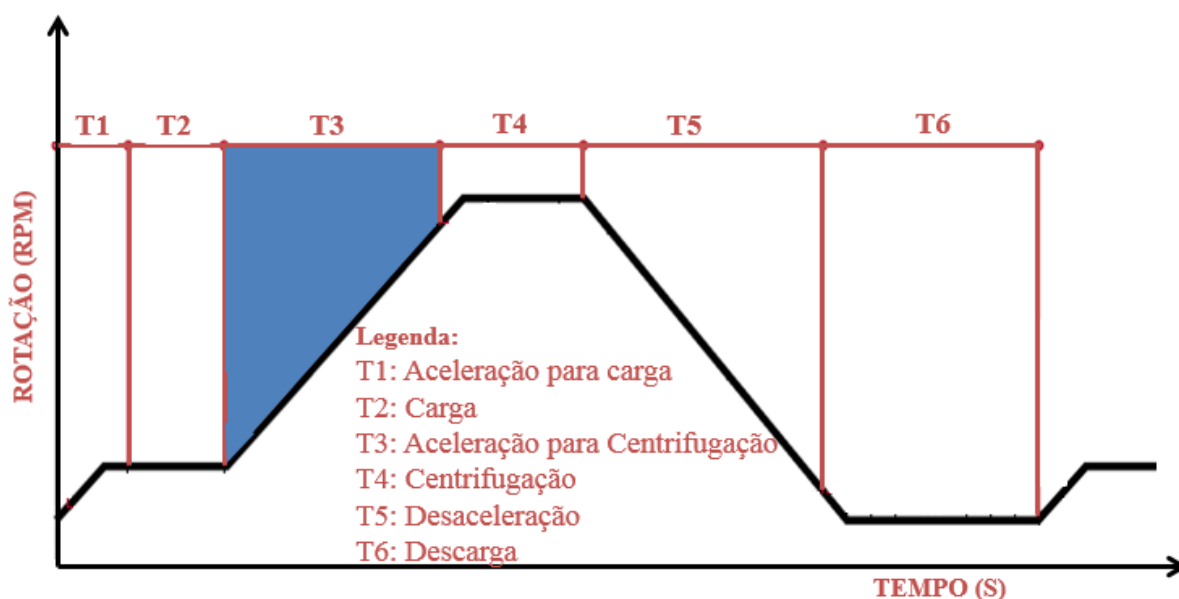
Fonte: (Elaborada pelo autor, 2016).

Apesar da instalação existente possuir 18 centrífugas, a análise ideal se dará em até de 4 em 4 máquinas, pois em função da alta demanda por energia na etapa de aceleração para centrifugação, são necessários intertravamentos elétricos entre as máquinas para que esta fase

⁵ MIT: motor de indução trifásico.

do ciclo de cada uma delas seja defasado da outra. A Figura 43 destaca a etapa de aceleração para centrifugação, que leva entre 30 e 40 segundos. Em uma máquina que executa 24 ciclos por hora, cada ciclo leva em torno de 150 segundos; consequentemente, a limitação de intertravamento possível é de 4 centrífugas, pois uma quantidade maior de centrífugas implicaria em uma máquina aguardar a outra concluir esta etapa crítica.

Figura 43 – Ciclo típico de uma centrífuga de batelada para fabricação de açúcar.



Fonte: (Adaptado de MAUSA, 2016).

7.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados do estudo de caso, oriundos da coleta de dados e análise desenvolvida para este trabalho, conforme a metodologia proposta nesta dissertação.

O objetivo do resultado final da análise é apresentar os benefícios, do ponto de vista técnico e econômico, do emprego de centrífugas modernas a serem utilizadas em substituição às aquelas existentes.

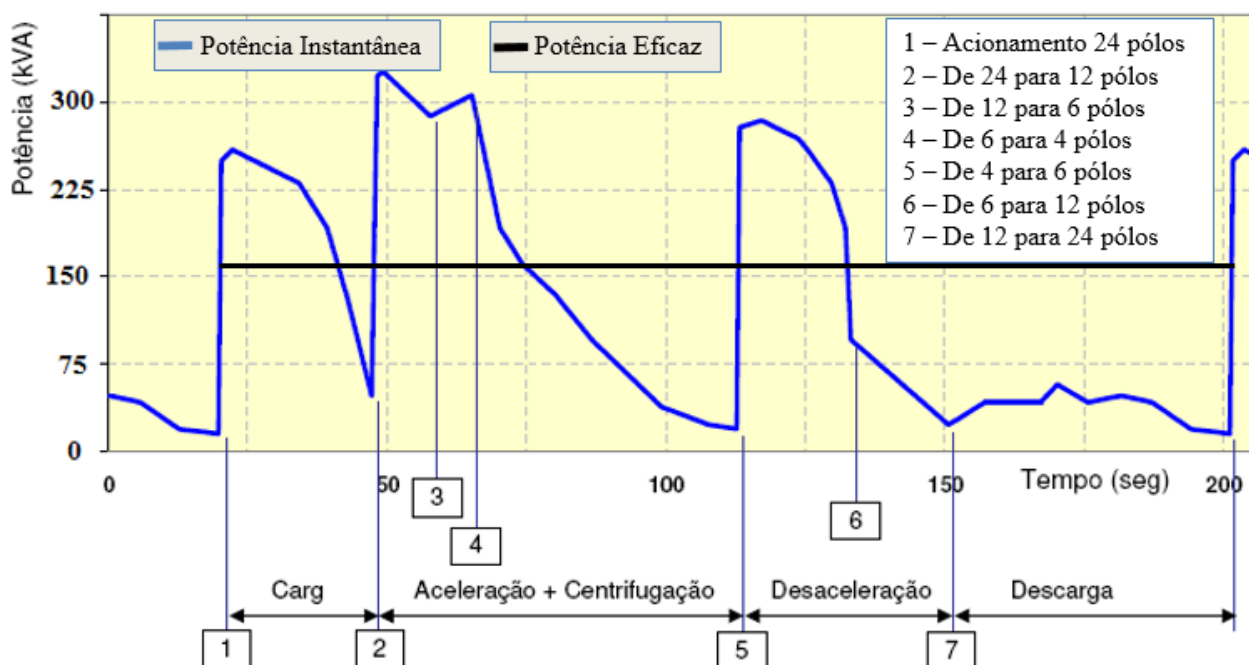
Cabe aqui a observação de que o estudo desenvolvido neste trabalho enfatiza somente a substituição das centrífugas de batelada existentes na planta, desconsiderando as demais oportunidades existentes como, por exemplo, a adequação da moenda e de outros equipamentos existentes.

7.3.1 Resultados da Primeira Fase

Na primeira fase da análise foram coletados os registros das centrífugas de batelada com acionamento por motores multi-pólos.

Com os valores coletados de uma máquina foi possível fazer a simulação para duas e quatro máquinas trabalhando em conjunto. Para facilitar a interpretação, a Figura 44 ilustra os detalhes da análise.

Figura 44 – Detalhes e comportamento típico de uma centrífuga de batelada acionada por motores multi pólos.



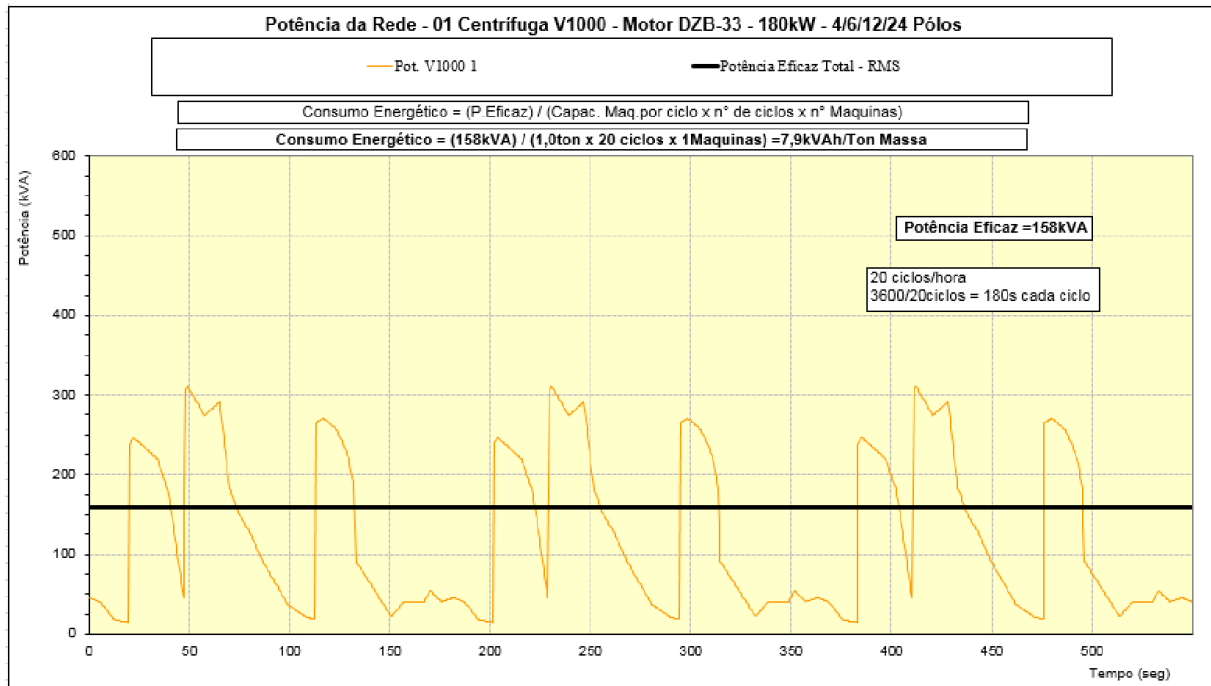
Fonte: (Elaborada pelo autor).

Com os registros de uma máquina em operação coletado conforme ilustra a Figura 45, tem-se que a potência eficaz total de uma máquina é de 158 kVA. Sabendo-se que esta máquina pode executar até 20 ciclos em uma hora e que sua capacidade de carga por ciclo é de 1000kg, aplicando-se a equação (13) temos que o consumo energético desta máquina é de 7,9 kVAh/Tonelada de massa.

De posse dos registros, foram feitas as análises onde, para a melhor condição de operação, foi feito o deslocamento dos ciclos no tempo, possibilitando assim, conhecer o comportamento energético de várias máquinas trabalhando em conjunto. Para o caso de duas máquinas, conforme ilustrado na Figura 46, a potência eficaz total é de 287 kVA. Com os demais dados

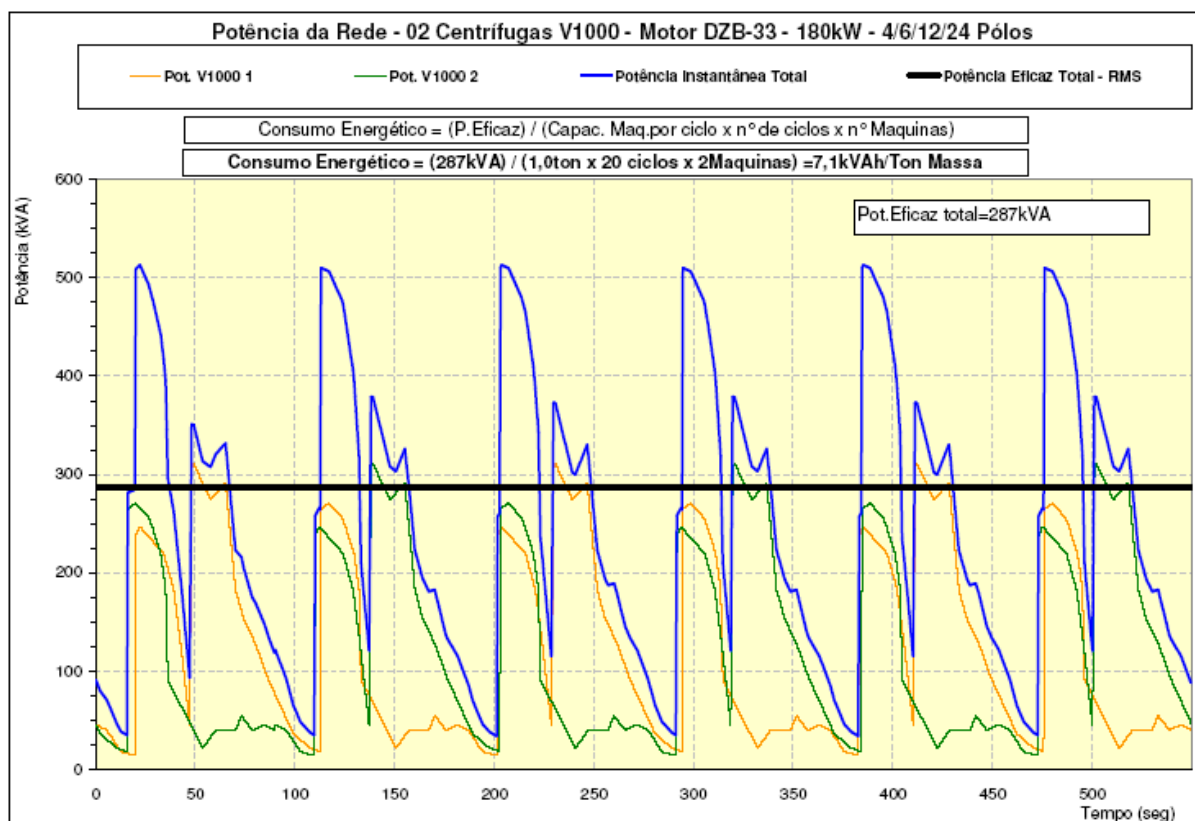
conhecidos, aplicando-se a equação (13) e considerando duas máquinas ao invés de apenas uma, temos que o consumo energético da instalação é de 7,1 kVAh/Tonelada de massa.

Figura 45 – Potência de uma centrífuga de batelada acionada por motores multi pólos.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

Figura 46 – Potência de duas centrífugas de batelada acionadas por motores multi pólos.

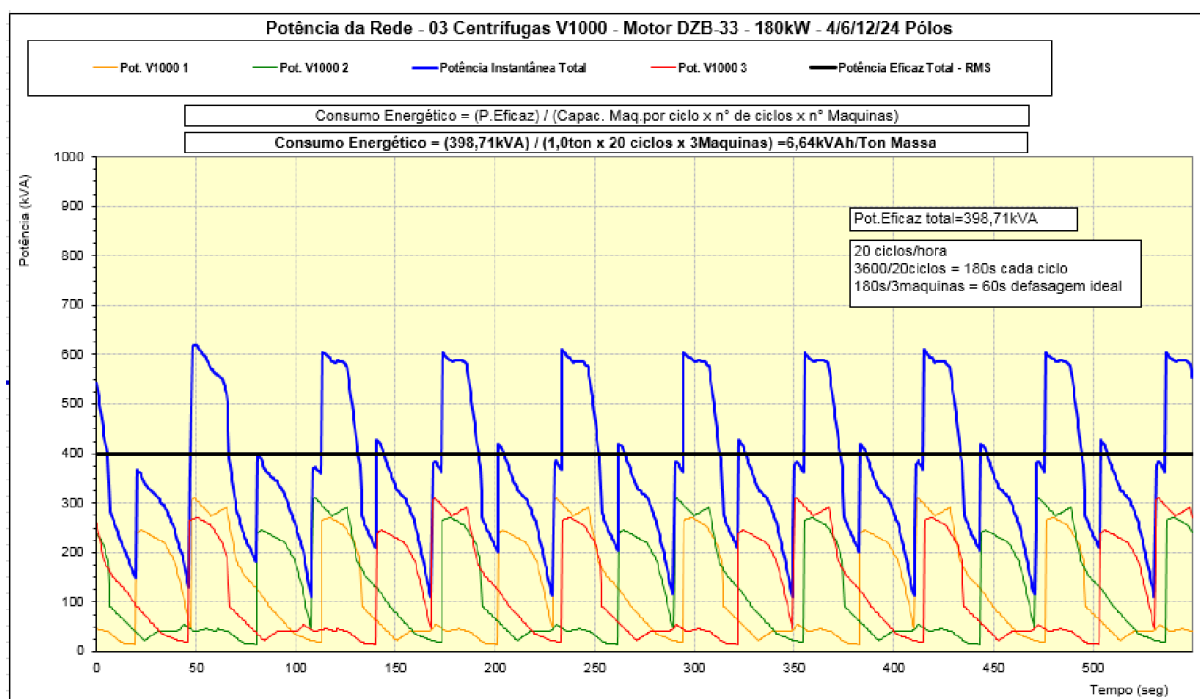


Fonte: (Elaborada pelo autor).

Para a configuração com três máquinas, conforme ilustra a Figura 47, temos que a potência eficaz total é de 398,71 kVA. Aplicando-se a equação (13), tem-se que o consumo energético da instalação é de 6,64 kVAh/Tonelada de massa.

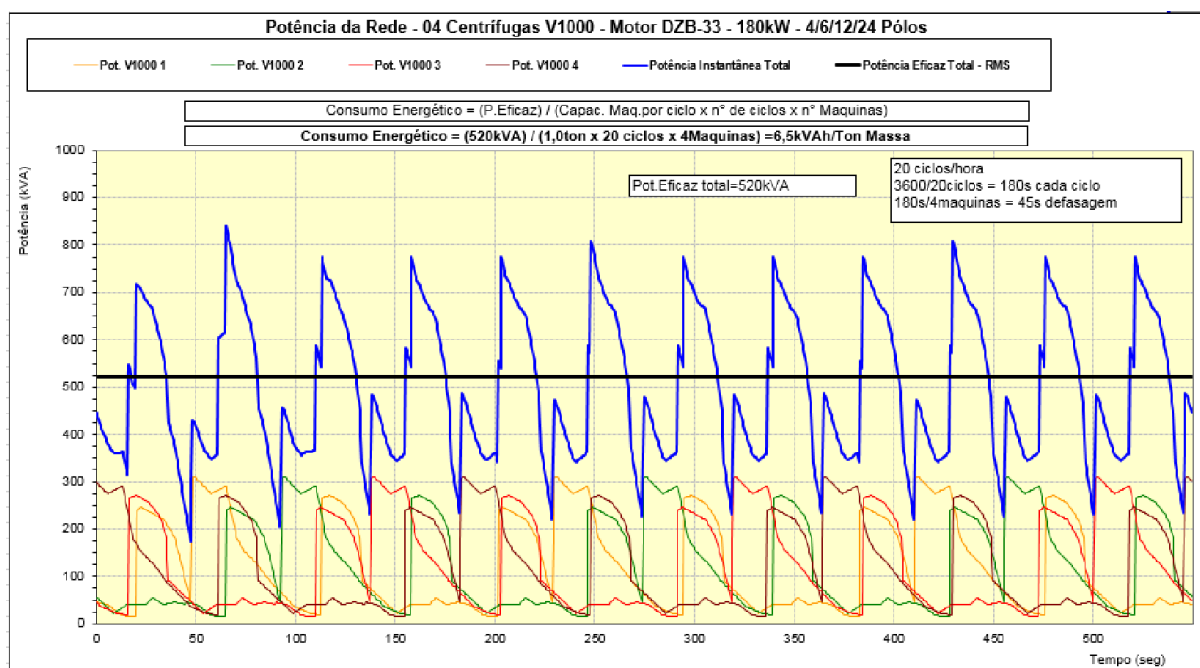
No caso de quatro máquinas, conforme ilustra a Figura 48, a potência eficaz total é de 520Kva. Aplicando-se a equação (13), tem-se que o consumo energético da instalação é de 6,5 kVAh/Tonelada de massa.

Figura 47 – Potência de 3 centrífugas de batelada acionadas por motores multi pólos.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

Figura 48 – Potência de 4 centrífugas de batelada acionadas por motores multi pólos.



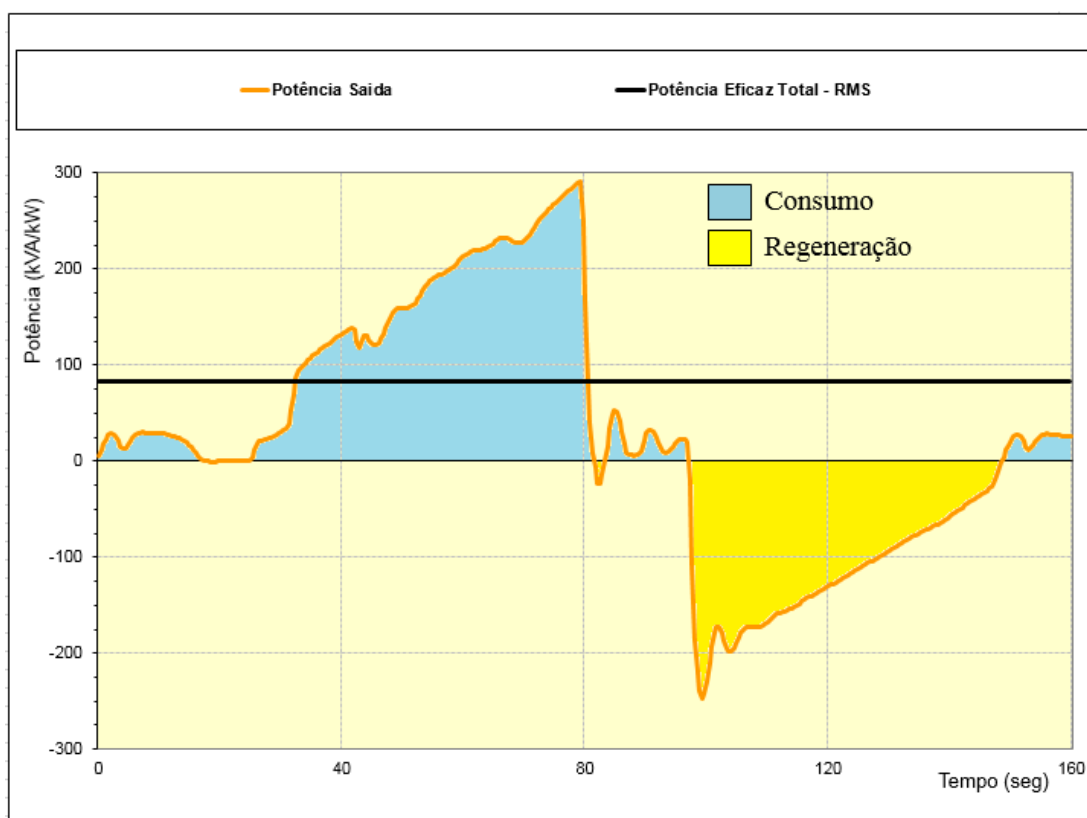
Fonte: (Elaborada pelo autor).

7.3.2 Resultados da Segunda Fase

Para a segunda fase da análise foi realizada a análise das centrífugas de batelada com acionamento por motor de indução e inversor regenerativo.

Assim como foi feito para o caso anterior, com os valores coletados de uma máquina foi possível fazer a simulação para duas, três e quatro máquinas trabalhando em conjunto. Para facilitar a interpretação, a Figura 49 ilustra os detalhes do comportamento gráfico.

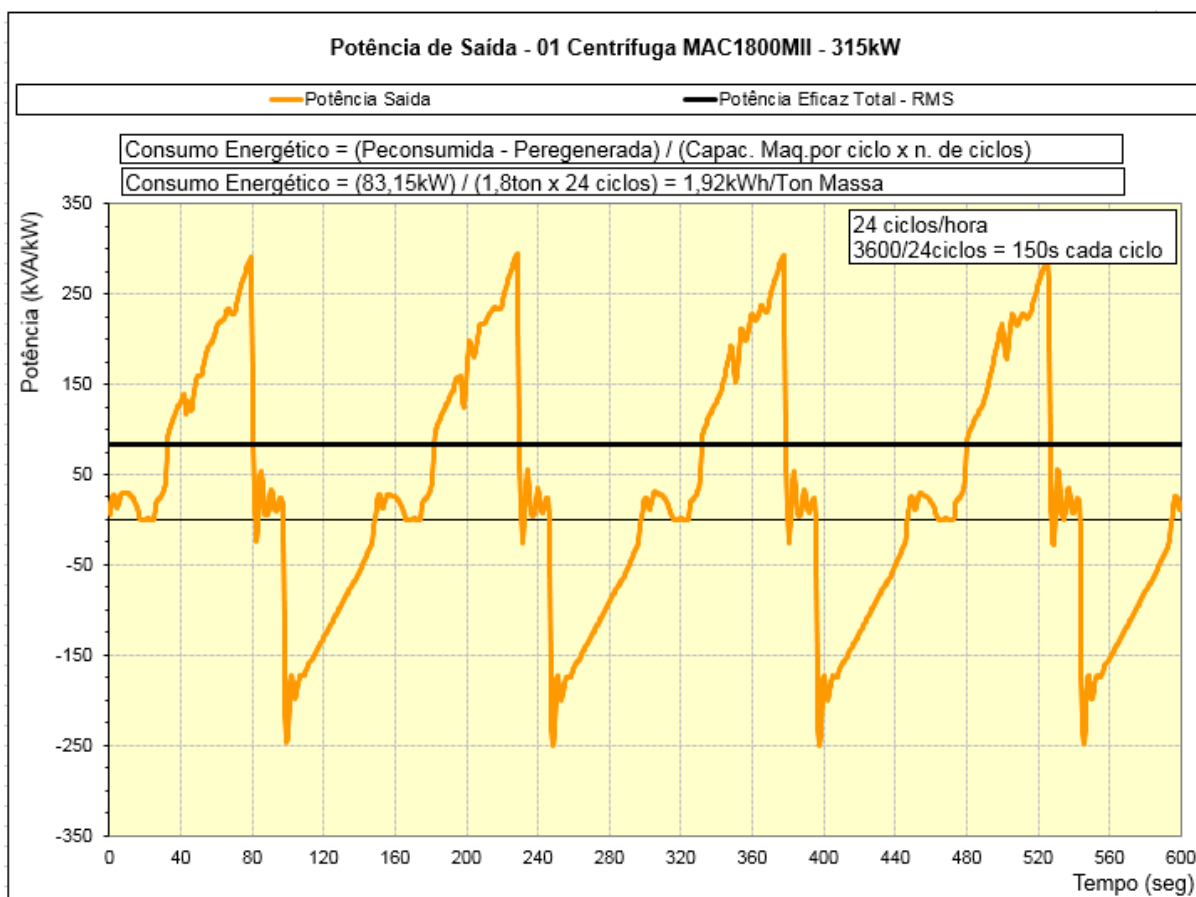
Figura 49 – Detalhes e comportamento típico de uma centrífuga de batelada acionada por motor de indução e inversor regenerativo.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

Com os registros de uma máquina em operação coletado conforme ilustra a Figura 50, tem-se que a potência eficaz total de uma máquina é de 83,15Kva. Sabendo-se que esta máquina pode executar até 24 ciclos em uma hora e que sua capacidade de carga por ciclo é de 1800kg, aplicando-se a equação (13), tem-se que o consumo energético desta máquina é de 1,92kVAh/Tonelada de massa.

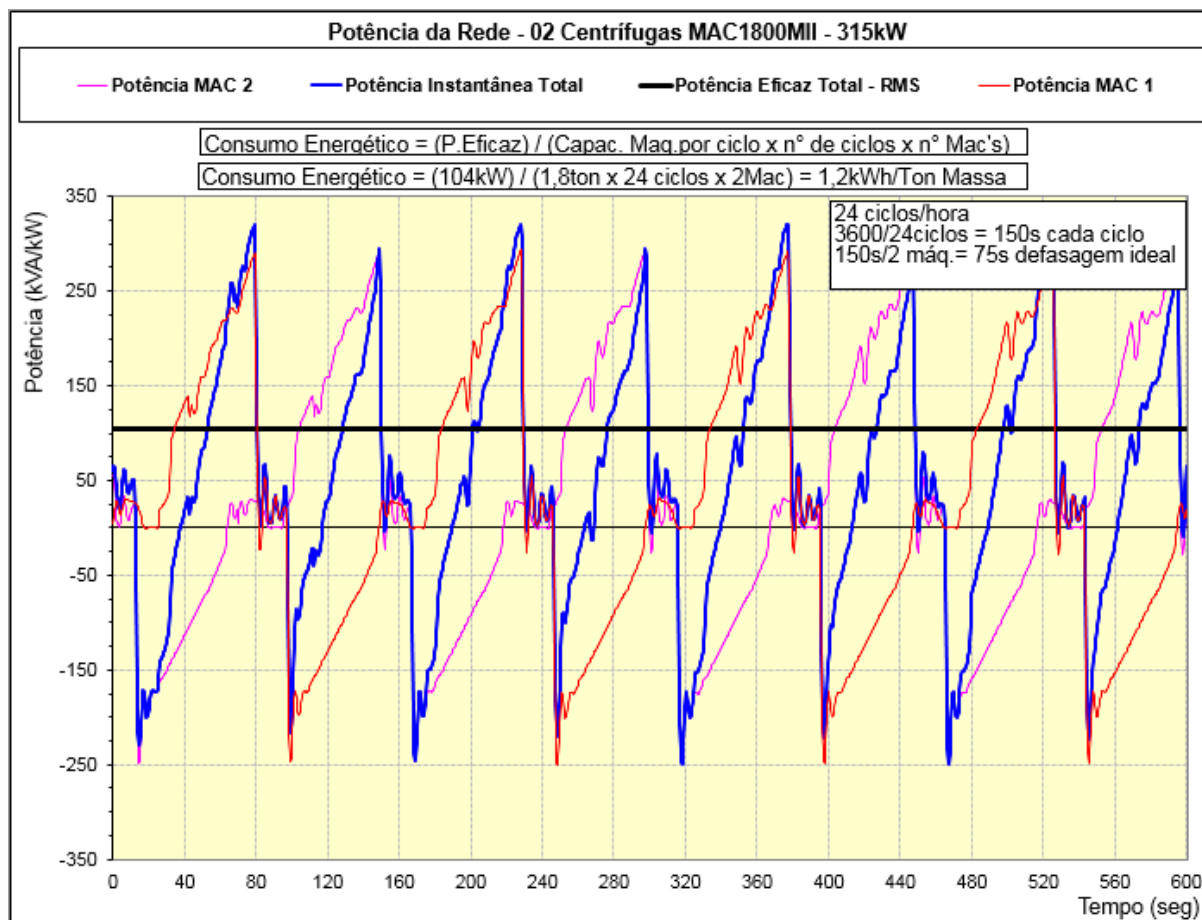
Figura 50 - Potência de uma centrífuga de batelada acionada por motor de indução e inversor regenerativo.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

Com os registros de uma máquina em operação coletado é possível fazer o deslocamento dos ciclos de outras máquinas no tempo para conhecer o comportamento energético de várias máquinas trabalhando em conjunto. No caso de duas máquinas, conforme ilustra a Figura 51, temos que a potência eficaz total é de 104kVA; tendo os demais dados conhecidos, aplicando-se a equação (13) e considerando duas máquinas ao invés de apenas uma, tem-se que o consumo energético da instalação é de 1,2kVAh/Tonelada de massa.

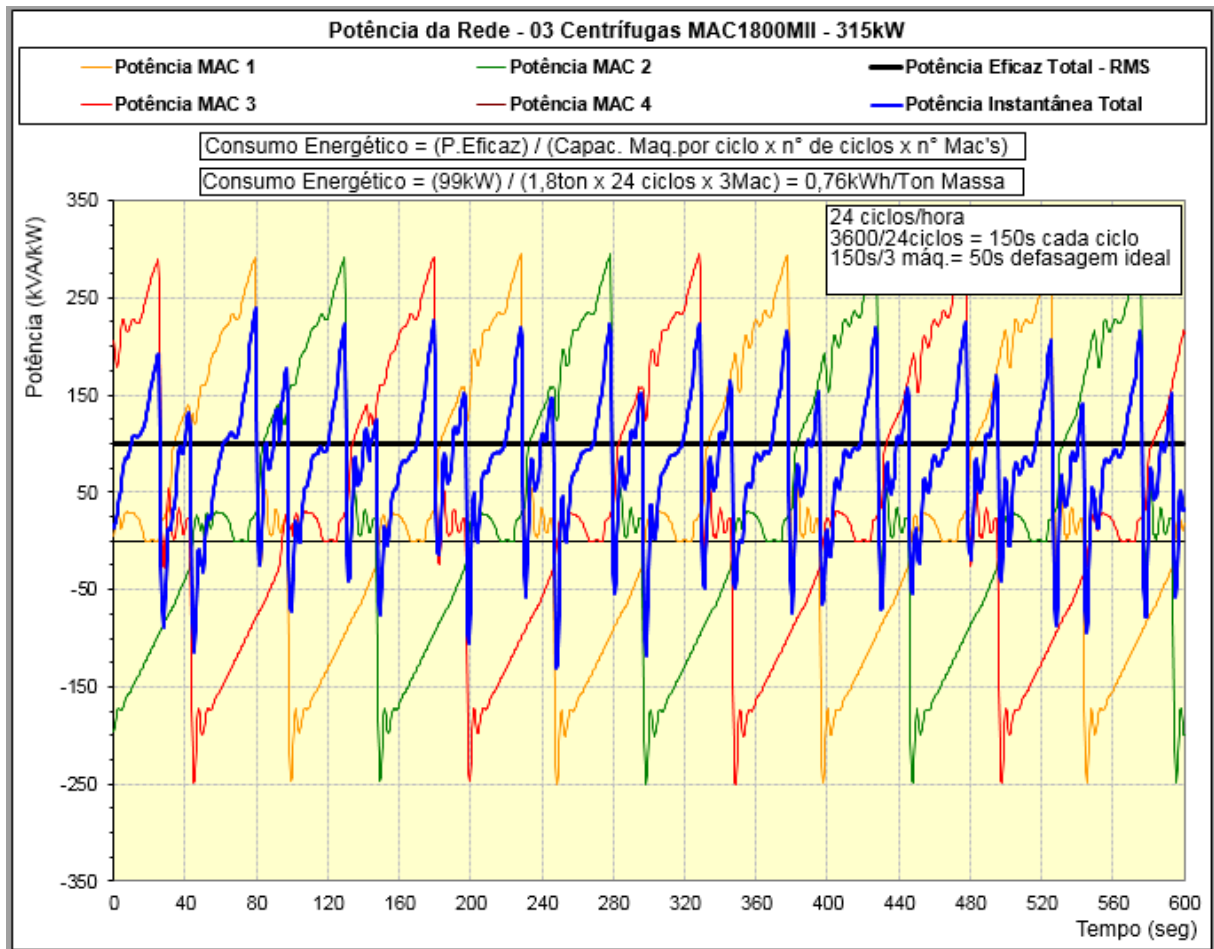
Figura 51 – Potência de duas centrífugas de batelada acionadas por motores de indução e inversores regenerativos.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

No caso de três máquinas conforme ilustra a Figura 52, tem-se que a potência eficaz total das três máquinas é de 99Kva; tendo os demais dados conhecidos, aplicando-se a equação (13) e considerando quatro máquinas, tem-se que o consumo energético da instalação é de 0,76kVAh/Tonelada de massa.

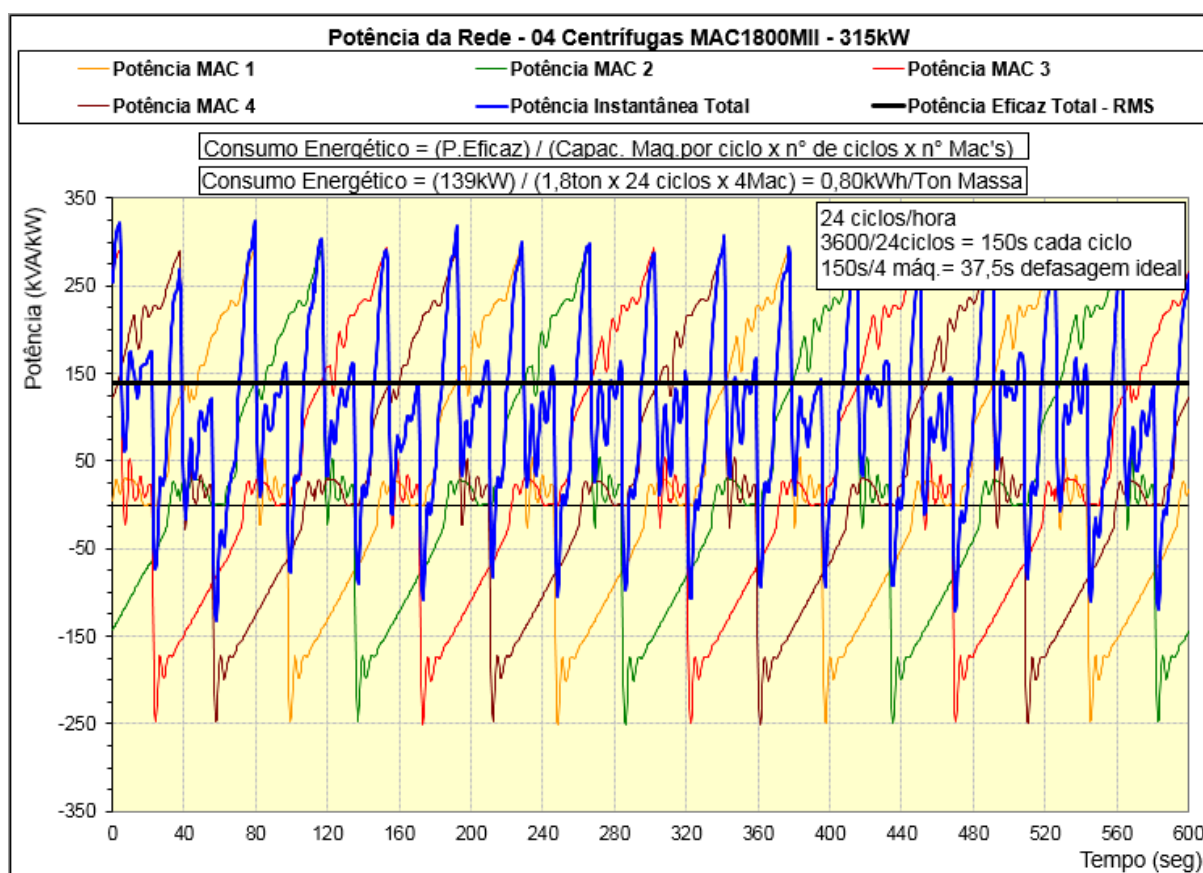
Figura 52 – Potência de três centrífugas de batelada acionadas por motores de indução e inversores regenerativos.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

No caso de quatro máquinas conforme ilustra a Figura 53, tem-se que a potência eficaz total de quatro máquinas é de 139kVA; tendo os demais dados conhecidos, aplicando-se a equação (13) e considerando quatro máquinas, tem-se que o consumo energético da instalação é de 0,80kVAh/Tonelada de massa.

Figura 53 – Potência de quatro centrífugas de batelada acionadas por motores de indução e inversores regenerativos.



Fonte: (Elaborada pelo autor).

7.3.3 Comparação entre os Resultados da Primeira e da Segunda Fase

7.3.3.1 Desempenho energético.

A Tabela 7 apresenta os resultados das análises gráficas da primeira e da segunda fase referente ao consumo energético das centrífugas:

Tabela 7 – Quadro comparativo entre as soluções adotadas na primeira e na segunda fase.

Estudo Comparativo do Consumo Energético			
Quantidade de máquinas	Primeira fase (kVAh/Tonelada de Massa)	Segunda fase (kVAh/Tonelada de Massa)	Ganho (%)
1	7,90	1,92	75,7
2	7,10	1,20	83,1
3	6,60	0,76	88,5
4	6,50	0,80	87,7

Fonte: (Elaborada pelo autor).

Nos resultados da primeira fase, nota-se que o consumo energético se mantém elevado e praticamente constante, empregando uma ou mais máquinas.

Isto também pode ser notado pelos valores representados nos gráficos, tanto da potência instantânea total, como da potência eficaz total, onde os estágios de alto consumo, tanto na aceleração quanto na desaceleração, contribuem significativamente para a elevação destes valores.

Nos resultados da segunda fase, nota-se que o consumo energético por tonelada processada é baixo, quando comparado com os resultados da primeira fase.

Na comparação entre os resultados gráficos, onde é possível ver o comportamento do consumo energético ao longo de todo o ciclo, nota-se que o momento de maior consumo se dá no período da aceleração, para as duas soluções. Em contrapartida, é no período de desaceleração que se apresenta a maior diferença entre as soluções. Na primeira fase o consumo de energia durante a desaceleração é tão elevado quanto na etapa de aceleração e, na segunda fase o consumo de energia na desaceleração, passa a ser negativo, ou seja, o motor passa a operar como gerador, diminuindo assim, o consumo médio de energia.

Nota-se também que, de acordo com os resultados da segunda fase, a configuração ideal de máquinas trabalhando em conjunto, é dada na condição com três máquinas.

7.3.3.2 Desempenho energético, produtivo e financeiro por safra.

Com base no resultado do consumo energético, onde a solução de melhor eficiência energética se dá em baterias de 3 máquinas, considerando a aplicação proposta no item 5.2, onde a instalação existente tem 18 máquinas com capacidade de 1000kg/ciclo cada e será

proposta a instalação de novas máquinas com capacidade de 1800kg/ciclo cada, aplicando-se as equações (14), (15) e (16), tem-se os resultados na Tabela 8:

Tabela 8 – Quadro comparativo do desempenho energético e produtivo por safra da solução existente e proposta.

Quantidade de máquinas	CE (Consumo Energético por Safra) (MVA)		PS (Produtividade por Safra) (Sacas)		NPS (Rendimento Energético Global por Safra [kVA/Saca de Açúcar])	
	V1000 (Existente)	MAC1800MII (Proposta)	V1000 (Existente)	MAC1800MII (Proposta)	V1000 (Existente)	MAC1800MII (Proposta)
3	1.996	496	2.600.640	5.617.382	0,77	0,09
6	3.992	993	5.201.280	11.234.765	0,77	0,09
9	5.988	1.489	7.801.920	16.852.147	0,77	0,09
12	7.983	1.986	10.402.560	22.469.530	0,77	0,09
15	9.979	2.482	13.003.200	28.086.912	0,77	0,09
18	11.975	2.979	15.603.840	33.704.294	0,77	0,09

Fonte: (Elaborada pelo autor).

De acordo com os resultados obtidos e com o objetivo de se manter o mesmo nível de produtividade, a adequação da instalação existente se dá pela substituição das 18 centrífugas V1000 por 9 Centrífugas MAC1800MII.

Em termos energéticos a adequação proposta traz um ganho de (11.975 MVA/Safra – 1.489 MVA/Safra) 10.486 MVA/Safra, que é a energia firme a mais que pode ser comercializada somente com a adequação das centrífugas. Isto equivale a um gerador de 1,5 MVA gerando energia durante 7 meses nesta unidade, ou o equivalente a um gerador eólico desta mesma potência em operação constante.

Das 371 usinas sucroalcooleiras atualmente em operação no país, segundo o fabricante das centrífugas, metade delas ainda trabalham com centrífugas com acionamento com motores multi-pólos. Sabendo que a solução estudada foi para uma usina de médio porte, adotando esta solução para a metade das usinas (185), se cada unidade disponibilizar um excedente de 1,5 MVA de energia para comercialização, teríamos um montante de 277,5 MVA de energia firme a serem injetados no SIN. Como fator de comparação, estes 277,5 MVA disponibilizados equivalem à construção de 10 PCH's de aproximadamente 30MVA cada.

Como já descrito anteriormente neste trabalho, a adequação das centrífugas é apenas uma, dentre muitas oportunidades que uma planta sucroalcooleira tem de melhorar sua eficiência energética e, assim, potencializar seus excedentes em energia. O excedente de energia gerado

pelas usinas sucroalcooleiras podem ser comercializados ao SIN, com os valores e condições contratuais praticados nos leilões de mercado gerenciados pela ANEEL. O sistema de geração é seguro e garantido pela grande quantidade de bagaço de cana disponível, ou seja, mesmo que a planta tenha algum problema de processo agrícola ou industrial, seu estoque de combustível é suficiente para manter a geração de energia por semanas, da mesma forma que um reservatório de água de uma usina hidrelétrica garante a geração em determinados períodos de baixa precipitação.

Aplicando-se as equações (17), (18), (19) e (20), obtém-se o resultado financeiro por safra após a adequação conforme ilustra a Tabela 9, onde pode-se notar que, somente com o ganho energético, a adequação tem o pay-back de uma centrífuga por safra MR\$2,13. Outro benefício da substituição das máquinas é que, neste caso, em função das capacidades entre a solução existente e a nova solução não serem múltiplas, respectivamente 1.000 e 1.800 kg/ciclo, tem-se um ganho em termos de capacidade produtiva de $(16.852.147 - 15.603.840) = 1.248.307$ sacas de açúcar por safra, que consequentemente pode gerar uma receita de MR\$61,78.

Tabela 9 – Análise financeira por safra da solução proposta.

Análise Financeira				
GS (Ganho de Produção com a solução proposta por safra) (Sacas)	GS(R\$) (Ganho financeiro com o aumento da produção com a nova solução proposta por safra) (MR\$)	EES (Excedente de energia proporcionado pela substituição das centrífugas por safra) (MVA/Safra)	EES(R\$) Ganho financeiro com a venda da energia excedente por safra (MR\$)	Investimento para compra e instalação de 9 máquinas (MR\$)
1.248.307	61,78	10.486	2,13	18,00

Fonte: (Elaborada pelo autor).

Apesar da abordagem dos resultados deste trabalho fazer referência ao período de geração de energia durante os sete meses de safra, existem usinas no Brasil coggerando energia elétrica também durante toda a entre-safra. Como toda a infraestrutura é existente (caldeira, turbina e gerador), a geração no período da entre-safra depende apenas da disponibilidade de bagaço, que é facilmente garantido nas usinas com o balanço energético adequado.

Vale destacar que a adequação das centrífugas de batelada utilizadas na produção de açúcar é apenas uma de muitas outras adequações que poderiam visar a eficiência energética de uma usina sucroalcooleira. A eletrificação das moendas a vapor, a substituição de grandes motores elétricos de baixa eficiência e a substituição de turbinas a vapor e geradores antigos

por equipamentos mais eficientes expressam melhora da eficiência energética global da planta, potencializando sua capacidade de venda de energia, uma vez que a quantidade de combustível disponível continuaria a mesma.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho dedicou-se à elaboração de um estudo que permitisse a análise energética e econômica na adequação de centrífugas de batelada para a produção de açúcar visando a eficiência energética de uma planta. Este estudo proposto foi elaborado com dados coletados na prática em campo e a simulação gráfica com estes dados permitiu a realização da análise energética e econômica de uma planta existente e em operação, considerando os dados básicos disponíveis em documentos públicos de veículos de comunicação do setor e de diversas outras publicações.

Do ponto de vista do estudo proposto e desenvolvido, conclui-se que:

- Os resultados obtidos foram satisfatórios e estão alinhados aos objetivos propostos inicialmente para a dissertação;
- A comparação entre os resultados obtidos pelo estudo desenvolvido e os resultados dos estudos realizados por outras publicações reconhecidas na áreas demonstra que ambos são compatíveis entre si, o que dá credibilidade ao estudo proposto, tanto sob a óptica da análise energética quanto da análise econômica;
- O objetivo de desenvolver um estudo de fácil interpretação, que permita a análise de eficiência energética e econômica na substituição de centrífugas com acionamento e controle convencionais utilizando motores de baixa eficiência, por uma solução com acionamento por inversores regenerativos utilizando motores de alto rendimento, foi alcançado com êxito.
- Também foram alcançados com sucesso os dois objetivos secundários deste trabalho, isto é, aplicar dados de uma solução real, com a coleta dos registros de consumo energético por tonelada de massa processada, fazendo uma análise comparativa entre o cenário atual existente e o proposto e o de utilizar esta análise para calcular os ganhos de eficiência energética e econômica que o investimento trará, comprovando a importância do emprego de equipamentos de alta eficiência no processo, possibilitando o melhor aproveitamento possível do potencial de geração da planta para o SIN.
- Além do êxito do estudo em relação aos objetivos básicos propostos, fez-se uma análise destes resultados considerando a representatividade da energia que deixou de ser consumida e que poderia ser disponibilizada para o SIN, seu impacto e comparações.
- A maneira empregada para a apresentação dos resultados obtidos é adequada, uma vez que utiliza tabelas e gráficos que permitem uma rápida leitura e interpretação das variáveis e valores mais importantes para a tomada de decisão.

- Em relação aos resultados obtidos nas análises do estudo do caso real abordado, ficou evidenciado que a adequação proposta caracteriza a melhor solução do ponto de vista energético e econômico o que evidencia a importância da necessidade dos estudos de viabilidade tanto energética quanto econômica destes equipamentos.

Finalmente, pode-se concluir que a dissertação apresentada contribui tanto para a área acadêmica quanto para a área comercial, uma vez que o estudo desenvolvido pode ser aplicado por estudantes, pesquisadores e profissionais de empresas da área de açúcar, etanol e energia, auxiliando na tomada de decisão para investimentos que visem o aumento da produtividade e da receita de um empreendimento sucroenergético.

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se:

- Desenvolvimento de um estudo complementar que analise a eficiência energética global da planta sucroalcooleira, considerando todos os principais consumidores de energia e possibilite conhecer a necessidade dos investimentos e o retorno que esta adequação traria na receita da empresa e no sistema elétrico nacional;
- Desenvolvimento de um estudo que apresente a relevância de programas de incentivo e financiamento por parte do governo federal, como o PROINFA, mostrando a importância da atuação destes incentivos não somente na geração e transmissão, como também na adequação de equipamentos obsoletos e de grande representação no consumo de energia;
- Expansão da abordagem da análise de modo a promover o cálculo de fatores que levem a cenários de otimização do retorno econômico do investimento (como por exemplo TIR, VPL e Payback Time);
- Inclusão do estudo de eficiência térmica e elétrica da planta com as devidas adequações, mostrando o ciclo do vapor na planta e o direcionamento da energia gerada para a comercialização;
- Estudo da comercialização da energia gerada em plantas sucroalcooleiras no mercado, apresentando os entraves existentes hoje que dificultam a competitividade desta energia, apresentando ferramentas e soluções que melhorem esta situação;
- Implementação de uma metodologia de análise de impactos socioambientais, com o objetivo de complementar os estudos de viabilidade das adequações nas plantas sucroalcooleiras.

REFERÊNCIAS

ABESCO, Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia. Disponível em: <<http://abesco.com.br>>. Acesso em 27 ago 2016.

AZZOLINI, Paulo César. 4º Congresso Brasileiro de Eficiência Energética e Cogeração de Energia da ABESCO. **Tecnologias de Turbinas a Vapor**. 23 mai 2007.

BALESTIERI, José Antônio Perrella. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: UFSC. (279 p.), 2002

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. Dissertação de Mestrado, Publicação ENM.DM 100A/06, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 157 p. 2006.

BP. British Petroleum. **Statistical Review of World Energy**. 64^a edição. Centre for Energy Economics Research and Policy, Heriot-Watt University, June 2015. 48 p.

BRASIL [a]. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3^a ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.

BRASIL [b]. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia 2023**. Brasília: MME/EPE, 2014. 434 p.

BRASIL [c]. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007. 408 p.

BRASIL [d]. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de Energia Elétrica Brasileira**. 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 28 ago 2016.

BRASIL [e]. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sistema Interligado Nacional**. 2016. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em 11 set 2016.

BRASIL [f]. Ministério de Minas e Energia. **Leilões de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/leiloes_de_energia/menu/inicio.html>. Acesso em: 12 set 2016.

BRASIL [g]. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Visão Geral das Operações da CCEE**, 2010. 408 p.

BRASIL [h]. Acende Brasil. **Leilões no Setor Elétrico Brasileiro: Análises e Recomendações**. Ed 7. Maio de 2012. Disponível em: <http://www.acendebrasil.com.br/media/estudos/2012_WhitePaperAcendeBrasil_07_Leiloes_Rev2.pdf>. Acesso em: 03 out 2016.

BRASIL [i]. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). EPE: Rio de Janeiro, 2016, 452p.: il; 21 x 29,7cm.

BRASIL [j]. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao/>>. Acesso em: 16 out 2016.

BRASIL [k]. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Setor Sucroalcooleiro Brasileiro: Evolução e Perspectivas**. Maria Célia Azeredo Vieira, 2005. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/liv_perspectivas/07.pdf>. Acesso em 02 nov 2016.

BRASIL [l]. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 0083/2012-SRD/ANEEL. Proposta de abertura de Audiência Pública para o recebimento de contribuições visando aprimorar a regulamentação acerca do fator de potência e cobrança do excedente de reativos**, 2012. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/documento/nota_tecnica_0083_daniel_dir.pdf>. Acesso em 10 jan 2017.

BRUNSTEIN I, TOMIYA E.H., **Modelo Econômico de Empresa Sucroalcooleira**. Gestão e Produção, v.2, n.3, 1995, p. 264-280.

CEPEA/ESALQ/USP. Centro de Estudo Avançados em Economia Aplicada. **Indicador da cotação do açúcar**. Disponível em: <<http://cepea.esalq.usp.br/acucar/>>. Acesso em 06 ago 2016.

CLETO, A. C. C.. **Motores elétricos de alto rendimento**. Tese de Mestrado, Faculdade do Porto, Portugal, 2012.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar** – Brasília. V. 3 - SAFRA 2016/17 N.1 - Primeiro levantamento. Abril de 2016.

CBCME. Comitê Brasileiro do Conselho Mundial de Energia. **Dicionário de Terminologia Energética**. 3ª ed. Rio de Janeiro. 2001, (324 p.).

DAVIDENKO, A. K., GRECHANICHENKO, V. I., TKACHENKO, A. I. Development of Centrifuge Construction for the Sugar Industry. **Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 40**, Nos. 7–8, 2004.

DEDINI. **Moendas Dedini MCD/01**. Catálogo. Disponível em <<http://www.codistil.com.br/>>. Acesso em 05 nov 2016.

DUETSCHKE, E. et al. Does it make a difference to the public where CO₂ comes from and where it is stored? An experimental approach to enhance understanding of CCS Perceptions. **Energy Procedia, v.63**, 2014, p. 6999–7010.

ELETROBRÁS, PROINFA: **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.elektrobras.com/elb/ProinfA/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>>. Acesso em 27 jul 2016.

EL-SHARKAWI, M. A. **Fundamentals of electric drives**. Thomson Learning, 2000.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional. BEN 2015**. 2015.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. **23º Leilão de Energia Nova A-5, Resumo Vendedor.** Realizado em 19/04/2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202016/Resultado_completo_site_23_len.pdf>. Acesso em 02 nov 2016.

FERNANDES, ANTONIO C. **Cálculos na Agroindústria da Cana de Açúcar.** STAB Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2ª Edição, 2003.

FIOMARI, M.C., et al., “Análise Termodinâmica e Termoeconômica de uma Usina Sucroalcooleira que Produz Excedente de Energia para Comercialização”. **Encontro de Energia no Meio Rural**, An.6. Campinas, SP, 2006.

GALLO, P. R., MARTINS, M. C .G., **A Medição de Brix na Industria Açucareira.** Medição de Graus Brix em Tachos de Cozimento de Açúcar por Meio de Micro-Ondas. 2012.

GE. GE Power Generator. **Power Generation Products & Solutions.** Disponível em: <<https://powergen.gepower.com/products.html>>. Acesso em: 04 nov 2016.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O., **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**, Editora da Universidade de São Paulo, 3ª edição revisada e ampliada, 2012.

HORDESKI, M. **Dictionary of Energy Efficiency Technologies.** Lilburn, GA Estados Unidos. The Fairmont Press, 2005.

JANNUZZI, G. M. **Aumentando a eficiência nos usos finais de energia no Brasil**, Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP, 2001.

JORNAL CANA, **Custo da Produção de Açúcar.** Custo de produção cresce, mas margem deve ser positiva para usinas. Disponível em: <<https://www.jornalcana.com.br/custo-de-producao-cresce-mas-margem-deve-ser-positiva-para-usinas/>>. Acesso em 06/ ago 2016.

KEEN, R. J. et. al., **Regenerative braking safety system and method of use**, Patent: US 9246432 B2. 2016.

KIMURA, J. et al., Produção de Energia Elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar. **Revista Nucleus**, Vol.7(1), p. 139-154, Abril 2010.

KORSCH, H. **Batch-type centrifuges**. Patent US 4097303 A, 1978.

LEITE, R. C.; CORTEZ, L. A. B., **O Etanol Combustível no Brasil, Biocombustíveis no Brasil - Realidades e Perspectivas**, Ministério das Relações Exteriores, P. 61-75, 2007.

LORA, E. S.; ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 4, p. 777–788, 2009.

MAUSA, Principal fabricante de centrífugas de batelada para açúcar do país. **Centrífuga Automática**. Disponível em: <<http://mausa.com.br/?pagina=produtos-detallhes&id=1>>. Acesso em 10 ago 2016.

MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **PROINFA. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias_contempladas.html>. Acesso em 23 jul 2016.

PNEf, Plano Nacional de Eficiência Energética. Ministério de Minas e Energia. **Premissas e diretrizes Básicas**.156p, 2011.

NASCIMENTO, H. R. **Geotecnologias e o Planejamento da Agricultura de Energia**. Málaga, Espanha: Eumed.Net, Universidade de Málaga, 2012.

NOVACANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar/>>. Acesso em 05 nov 2016.

OLIVEIRA, R. A. H. **Sistema de Frenagem Regenerativa com Motor de Indução Linear do Veículo MagLev-Cobra**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. **Annals of Operations Research**, Amsterdam, v.169, n.1, p.117-130, jul. 2009.

PAIVA, R. P. O. **Modelagem do Planejamento Agregado da Produção em Usinas Cooperadas do Setor Sucroenergético Utilizando Programação Matemática e Otimização Robusta**. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

PAIVA, R. P. O; MORABITO, R. Programação estocástica robusta aplicada ao planejamento agregado da safra em usinas cooperadas do setor sucroenergético. **Gestão & Produção**, v.18, n.4, p. 719-738, jan. – abr. 2011.

PAZIAN, J. A. **Desenvolvimento de uma metodologia para análise do potencial de cogeração de energia elétrica em usina de açúcar e álcool**. BAURU, 2004.

QUEIROZ, GIL M. O. R.: **Análise de dificuldades técnicas e econômicas na inserção da cogeração pelas usinas sucroalcooleiras**. Dissertação de mestrado, Ilha Solteira, 2008.

REIN, P. **Cane Sugar Engineering**, 1st edition (Verlag Dr. Albert Bartens KG), Berlin, 2007.

REIS, L.; FADIGAS, E; CARVALHO, C. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. Barueri, 2012

SANTOS, A. H. C. FAGÁ, M. T. W. SANTOS, E. M.. The risks of an energy efficiency policy for buildings based solely on the consumption evaluation of final energy. **Electrical Power And Energy Systems** 44, São Paulo, Brazil, p. 70-77. 05 Jul. 2012.

SANTOS, A. H. C., **Uma Contribuição ao Estudo dos Freios de Atrito para Aplicação em Frenagem Regenerativa**. Tese Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. 175p.

SILVA, R. B. **Aplicação da produção mais limpa no processo de clarificação do caldo de cana para produção de açúcar**. Departamento de Engenharia de Produção, UNEMAT. 2008.

STIEGERT, S. et al.,. **International Sugar Journal**. No. 1361, vol. 114, 2012.

SUGAR INDUSTRY/ZUCKERINDUSTRIE, **Market overview sugar centrifugals**, 132, n.6, pag 488, 2007.

TAVARES, A. M. et al. Um estudo sobre a frenagem regenerativa de trens utilizando gerador linear de indução. In: CBA (Ed.), **Congresso Brasileiro de Automática (CBA)**, 17, pp. 40-45, 2010.

TGM. Soluções TGM. Energia_Eletrica. .JPEG. 2016. 820x519 pixels. 68,23 Kb. Formato: JPEG bitmap. Disponível em: <<http://www.grupotgm.com.br/solucoes> >. Acesso em: 04 nov. 2016.

TOLMASQUIM, M.T., GUERREIRO, A., GORINI, R. **Matriz Energética Brasileira**. Uma Prospectiva. Novos Estudos, CEBRAP-Centro Brasileiro de Análise e Planejamento vol. 79. pp. 47-69, 2007.

UDAETA, M. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos para o Setor Elétricos , Pensando no Desenvolvimento Sustentável**, Tese de Doutorado USP, 1997.

UDOP, UNIÃO DOS PRODUTORES, Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=acucar>>. Acesso em 06 ago 2016.

ÚNICA, UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linhadotempo/index.html>>. Acesso em 9 set 2016.

WALTER, A. C. **Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termelétrica junto ao setor sucro-alcooleiro**. 1994. 283 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.