

ADILSON EUGENIO SALESSU CHICOA

**ELETRIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE EXTRAÇÃO E PREPARO EM USINAS DE
AÇÚCAR E ETANOL: ANÁLISE DE APLICAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
NA SUBSTITUIÇÃO DE ACIONAMENTOS MECÂNICOS**

SÃO PAULO

2017

ADILSON EUGENIO SALESSU CHICOA

**ELETRIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE EXTRAÇÃO E PREPARO EM USINAS DE
AÇÚCAR E ETANOL: ANÁLISE DE APLICAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
NA SUBSTITUIÇÃO DE ACIONAMENTOS MECÂNICOS**

**Monografia apresentada ao Programa
de Educação Continuada da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Especialista em Energias Renováveis,
Geração Distribuída e Eficiência
Energética.**

**Área de Concentração: Eficiência
Energética**

**Orientador: Prof. Dr. José Aquiles
Baesso Grimoni**

SÃO PAULO

2017

Catálogo-na-publicação

CHICOA, ADILSON EUGENIO SALESSU
ELETRIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE EXTRAÇÃO E PREPARO EM
USINAS DE AÇÚCAR E ETANOL: ANÁLISE DE APLICAÇÃO E EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA NA SUBSTITUIÇÃO DE ACIONAMENTOS MECÂNICOS / A. E. S.
CHICOA – São Paulo, 2017.
115 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída
e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Indústria de Açúcar e Etanol 2. Bioeletricidade da Cana-de-Açúcar
3. Motores Elétricos e Sistemas de Partida 4. Eficiência Energética
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de
Educação Continuada em Engenharia II. t.

Dedico este trabalho à minha família
e amigos, pelo apoio e encorajamento
durante a minha vivência no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da Vida.

Aos meus pais e irmãos, que mesmo à distância, sempre me incentivaram e encorajaram na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni pela orientação, amizade e compreensão ao longo deste trabalho.

A todos os professores do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da universidade de São Paulo, por todo conhecimento e experiência transmitidos durante todo curso.

Aos meus amigos que colaboraram direta ou indiretamente pelo companheirismo e auxílio durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho na Siemens Ltda, em particular da Engenharia de Aplicação da divisão de Conversores de Frequência e Motores de alta potência (*Large Drives*), por todo apoio e conhecimentos trocados durante o trabalho.

RESUMO

Com a crescente demanda energética verificada no Brasil e necessidade de diversificação da matriz energética brasileira, as grandes usinas de açúcar e etanol, passaram a utilizar o bagaço de cana-de-açúcar, subproduto do processo de produção de açúcar e etanol, para produção da própria energia elétrica, ganhando autossuficiência energética e maximizando seus lucros com a venda da energia produzida excedente.

A eletrificação dos sistemas de extração e preparo da cana-de-açúcar, vem justamente com o propósito de eliminar o consumo de vapor no processo de moagem da cana, com a substituição de acionamentos convencionais com turbinas a vapor, por acionamentos elétricos com motores elétricos e conversores de frequência de alta eficiência em Ternos de Moenda, Picadores e Desfibradores. Com isto, aumenta-se a disponibilidade de vapor na planta, para geração de energia elétrica.

Este trabalho aborda de forma detalhada e abrangente todos os detalhes de aplicação, eficiência e ganhos energéticos do processo de Eletrificação de Sistemas de Extração e Preparo da cana-de-açúcar em Usinas de açúcar e etanol.

Palavras Chave: Eletrificação, Bioeletricidade, Eficiência, Cogeração, Energia, Cana-de-açúcar, Bagaço, Motores Elétricos, Conversores de Frequência.

ABSTRACT

With the growing energy demand in Brazil and the needs for diversification of the Brazilian energy matrix, the large sugar and ethanol plants started to use sugarcane bagasse, a byproduct of the sugar and ethanol production process, for the production of electric power. Gaining energy self-sufficiency and maximizing their profits through the sale of over-produced energy.

The electrification of the systems of extraction and preparation of the sugar cane, comes precisely with the purpose of eliminating the consumption of steam in the process of milling of the cane, with the substitution of conventional drives with steam turbines, by electrical drives with electric motors and converters. Of high efficiency frequency in Grinding Suits, Choppers and Defrosters. With this, the availability of steam in the plant is increased, for electric power generation.

This academic thesis explains in a detailed and comprehensive manner all the details of application, efficiency and energetic gains of the process of Electrification of Systems of Extraction and Preparation of sugar cane in sugar and ethanol plants.

Keywords: Electrification, Bioelectricity, Efficiency, Cogeneration, Energy, Sugar Cane, Bagasse, Electric Motors, Frequency Converters.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: CANA-DE-AÇÚCAR.....	20
FIGURA 2.2: COMPOSIÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	21
FIGURA 2.3: DISTRIBUIÇÃO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL.....	23
FIGURA 2.4: DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O PROCESSAMENTO DE CANA.....	23
FIGURA 2.5: FACAS ROTATIVAS.....	25
FIGURA 2.6: DESFIBRADOR DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	26
FIGURA 2.7: ROLOS DE UM TERNO DE MOENDA.....	28
FIGURA 2.8: DIAGRAMA DE COGERAÇÃO.....	32
FIGURA 2.9: SETORES INDÚSTRIAS COM SISTEMAS DE COGERAÇÃO.....	33
FIGURA 2.10: SISTEMA DE COGERAÇÃO TÍPICO EM USINAS DE AÇÚCAR E ETANOL.....	34
FIGURA 2.11: BALANÇO TÉRMICO EM USINAS ANTIGAS.....	35
FIGURA 2.12: BALANÇO TÉRMICO EM USINAS MODERNAS.....	36
FIGURA 2.13: ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UMA CALDEIRA.....	37
FIGURA 2.14: CALDEIRA AQUOTUBULAR.....	40
FIGURA 2.15: COMPONENTES DE UMA TURBINA.....	41
FIGURA 2.16: ROTOR DE UMA TURBINA MULTISTÁGIOS.....	42
FIGURA 2.17: ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO TURBINA DE CONDENSAÇÃO COM EXTRAÇÃO.....	43
FIGURA 2.18: REDUTOR DE VELOCIDADE ACOPLADO AO TERNO DE MOENDA EM UMA USINA.....	44
FIGURA 2.19: GERADOR SÍNCRONO E SUAS PRINCIPAIS PARTES.....	46
FIGURA 3.1: COMPLEMENTARIDADE DA MOAGEM DE CANA COM O REGIME DAS CHUVAS.....	49
FIGURA 3.2: GERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM BIOMASSA DA CANA NO BRASIL.....	50
FIGURA 3.3: PROJEÇÃO DA AUTOPRODUÇÃO DE ELETRICIDADE.....	51
FIGURA 3.4: EVOLUÇÃO DA BIOELETRICIDADE EXPORTADA PARA O SIN.....	54
FIGURA 3.5: POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE (TWH).....	56
FIGURA 4.1: POTÊNCIA INSTALADA EM UMA USINA.....	58
FIGURA 4.2: COMPARATIVO DE EFICIÊNCIA ENTRE SISTEMAS DE ACIONAMENTO.....	60
FIGURA 4.3: EXCEDENTE DE ENERGIA, POR DIFERENTES SISTEMAS DE ACIONAMENTO.....	61
FIGURA 4.4: GERAÇÃO EM SISTEMA DE VAPOR DE ALTA PRESSÃO E CONDENSAÇÃO COM ACIONAMENTOS MECÂNICOS.....	63
FIGURA 4.5: GERAÇÃO EM SISTEMA DE VAPOR DE ALTA PRESSÃO E CONDENSAÇÃO COM ACIONAMENTOS ELÉTRICOS.....	64
FIGURA 4.6: MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO.....	66
FIGURA 4.7: ESTATOR DE UM MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO.....	66
FIGURA 4.8: ROTOR DE UM MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO.....	67
FIGURA 4.9: CURVAS DE TORQUE PARA DIFERENTES TIPOS DE CARGA.....	67
FIGURA 4.10: FÓRMULAS ÚTEIS PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS DE MOTORES DE ASSÍNCRONOS.....	69
FIGURA 4.11: MOTORES DE ALTO RENDIMENTO X RENDIMENTO PADRÃO.....	70

FIGURA 4.12: PICADOR E DESFIBRADOR ACOPLADOS AOS RESPECTIVOS MOTORES ELÉTRICOS.....	72
FIGURA 4.13: MOTORES ELÉTRICOS ACOPLADOS AOS TERNOS DE MOENDA.....	73
FIGURA 4.14: MOTOR ACOPLADO A UM ROLO INDIVIDUAL DO TERNO DE MOENDA.....	74
FIGURA 4.15: CURVAS DE TORQUE X VELOCIDADE MOTORES E MOENDAS.	76
FIGURA 4.16: ESQUEMÁTICO DE PARTIDA DIRETA DE MOTOR EM MÉDIA TENSÃO.....	77
FIGURA 4.17: CORRENTE DE PICO EM SISTEMAS DE PARTIDA DIRETA DE MOTORES.....	78
FIGURA 4.18: CURVA DE TORQUE DE MOTORES ASSÍNCRONOS EM PARTIDA DIRETA.....	79
FIGURA 4.19: PARTIDAS A FRIO E A QUENTE DE MOTORES DE MÉDIA TENSÃO.	79
FIGURA 4.20: MOTOR ACIONADO POR SOFT STARTER (TIRISTORES EM ANTIPARALELO)....	80
FIGURA 4.21: ÂNGULO DE DISPARO DE TIRISTORES EM SOFT STARTERS.....	80
FIGURA 4.22: CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	81
FIGURA 4.23: RETIFICADOR DE 6 PULSOS E FORMA DE ONDA.	82
FIGURA 4.24: MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSOS.....	83
FIGURA 4.25: CURVA DE TORQUE POR VELOCIDADE EM PARTIDAS COM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	83
FIGURA 4.26: CURVA DE EFICIÊNCIA DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	84
FIGURA 4.27: SISTEMA DE PARTIDA DE TRANSFERÊNCIA SÍNCRONA DE MOTORES DO PREPARO	86
FIGURA 4.28: SISTEMA DE PARTIDA DE TRANSFERÊNCIA ASSÍNCRONA DE MOTORES DO PREPARO	87
FIGURA 4.29: ACIONAMENTO DE SEIS TERNOS DE MOENDA COM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	89
FIGURA 4.30: ACIONAMENTO DOS ROLOS DE UM TERNO DE MOENDA COM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	90
FIGURA 4.31: ACIONAMENTO DOS ROLOS DE UM TERNO DE MOENDA COM CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	91
FIGURA 4.32: FORMA DE ONDA SENOIDAL DA FUNDAMENTAL E SUAS DECOMPOSIÇÕES....	92
FIGURA 4.33: FORMA DE ONDA SENOIDAL DA FUNDAMENTAL SOMADA AS SENOIDES HARMÔNICAS COM PERÍODOS IGUAIS A MÚLTIPLOS INTEIROS DA FUNDAMENTAL.....	92
FIGURA 5.1: CURVA DE TORQUE POR ROTAÇÃO DO MOTOR ESPECIFICADO.	99
FIGURA 5.2: MOTOR ELÉTRICO NA INSTALAÇÃO, ACOPLADO AO TERNO.....	100
FIGURA 5.3: DIAGRAMA UNIFILAR DO ACIONAMENTO.....	100
FIGURA 5.4: VISÃO GERAL DO PAINEL DO CONVERSOR E TRANSFORMADOR.....	102
FIGURA 5.5: PAINEL DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA EM SALA ELÉTRICA.....	102
FIGURA 5.6: MEDIÇÃO NO PAINEL DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR.....	103
FIGURA 5.7: CICLO DE VIDA DOS MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO.	107
FIGURA 5.8: CÁLCULO DOS CUSTOS DE ENERGIA DURANTE 20 ANOS.	108

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: CICLO PADRÃO DE CORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	22
TABELA 2.2 - PRODUÇÃO DE BIOMASSA POR QUANTIDADE DE CANA PROCESSADA	31
TABELA 3.1 - CLASSIFICAÇÃO DAS USINAS QUANTO AO PORTE	49
TABELA 3.2 - POTÊNCIA OUTORGADA NO BRASIL.	51
TABELA 3.3 - POTÊNCIA OUTORGADA POR FONTES DE BIOMASSA	52
TABELA 3.4 - UNIDADES PRODUTORAS DE BIOELETRICIDADE COM SELO ENERGIA VERDE.....	53
TABELA 3.5 - BIOELETRICIDADE GERADA PARA O SIN 2016 E 2017	53
TABELA 3.6 - PRODUÇÃO E CONSUMO DE ELETRICIDADE NAS USINAS	55
TABELA 3.7 - BIOELETRICIDADE COMERCIALIZADA EM LEILÕES REGULADOS	55
TABELA 4.1 - RENDIMENTOS NOMINAIS DE MOTORES DE ACORDO COM A NBR 7094	71
TABELA 4.2 - TAMANHOS E POTÊNCIAS DE REFERÊNCIA EM MOENDAS	74
TABELA 4.3: PRINCIPAIS DADOS DA MOENDA	75
TABELA 4.4: MOTOR ESPECIFICADO PARA A MOENDA	76
TABELA 4.5 - LIMITES DE DISTORÇÃO TOTAL DE TENSÃO E CORRENTE PELA IEEE 519.....	93
TABELA 4.6 - COMPARATIVO CENÁRIO MECANIZADO X ELETRIFICADO.....	95
TABELA 5.1 - DADOS TÉCNICOS DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	101
TABELA 5.2 - CÁLCULO DOS CUSTOS DE ENERGIA DURANTE 20 ANOS.....	107

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

SIN – Sistema Integrado Nacional
ONS – Operador Nacional do Sistema
ÚNICA – União da Indústria de Cana-De-Açúcar
EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ABRACEL - Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia
MME – Ministério de Minas e Energia Elétrica
UDOP – União dos Produtores de Bioenergia
INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia
BEN – Balanço Energético Nacional
UTE – Usina Termelétrica
TCH – Toneladas de Cana por hora
TFH – Toneladas de Fibra por hora
t/h – Toneladas por hora
RPM – Rotações por minuto
ACR – Ambiente de Contratação Regulada
ACL - Ambiente de Contratação Livre
Pol (Caldo) – Porcentagem de sacarose aparente no caldo;
Pol (Cana) - Porcentagem de sacarose aparente na cana;
Kg – Quilograma
Kg / t– Quilograma por tonelada
CO₂ – Dióxido de Carbono
tCO₂ – Toneladas de Dióxido de Carbono
Bar – Unidade de medição de pressão
°C – Graus Celsius (unidade de medição potência temperatura)
CV – Cavalo Vapor (unidade de medição de potência mecânica)
Vac – Volts (unidade de medição de tensão elétrica alternada)
kV – Kilo Volt (múltiplo da unidade de medição de tensão elétrica)
kW – Mega Watts (múltiplo da unidade de medição de Potência elétrica)
MW – Mega Watts (múltiplo da unidade de medição de Potência elétrica)
MWmed – Mega Watts médios (múltiplo da unidade de medição de Potência elétrica)
GWh – Giga Watts hora (múltiplo da unidade de consumo de Potência elétrica)

TWh – Tera Watts hora(múltiplo da unidade de consumo de Potência elétrica)

M – Momento ou Conjugado

n – Rotação de motores

N.m – Newton x metros (unidade de medida de Torque ou conjugado)

NBR – Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

SCR – Retificador controlado de silício

PWM – Modulação por largura de Pulsos

DC – Corrente Continua

Hz – Hertz

IGBT – Transistor Bipolar de Porta Isolada

DJ1, DJ2, DJn – Cubículo com Disjuntor de Proteção

C1, C2, Cn - Cubículo com Contator de Chaveamento

M1, M2, Mn – Motor elétrico

THDi – Distorção Harmônica de Corrente

THDv - Distorção Harmônica de Tensão

IEEE - Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (entidade dos Estados Unidos)

PCC – Ponto de Conexão Comum

CLP – Controlador Lógico Programável

ONU – Organização das Nações Unidas

USD – Denominação para a moeda dos Estados Unidos da América

kgf/cm2 – Quilograma força por centímetro quadrado (Unidade de medição de pressão)

kVA – Kilo Volt Ampere Reativo (Unidade de medição de potência aparente)

m3/s – metros cúbicos por segundo (unidade de medição de vazão)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA.....	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – CONCEITO	20
2.2 CICLO DE PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	20
2.3 SETORES DE UMA USINA RELACIONADOS AO ESTUDO.....	23
2.3.1.1 PICADORES (FACAS ROTATIVAS) E DESFIBRADORES.....	24
2.3.2.1 MOENDAS	28
2.4 PROCESSO DE COGERAÇÃO DE EM UMA USINA DE CANA DE AÇÚCAR E ETANOL	32
2.4.2.1 BALANÇO TÉRMICO E DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR NA USINA.....	34
2.4.3.1 CALDEIRAS	37
2.4.3.1.1 CALDEIRAS TÍPICAS DE UMA USINA DE AÇÚCAR E ETANOL.....	39
2.4.3.2 TURBINAS À VAPOR.....	40
2.4.3.2.1 TURBINAS TÍPICAS EM USINAS DE AÇÚCAR E ETANOL.....	43
2.4.3.3 REDUTOR DE VELOCIDADES.....	44
2.4.3.4 GERADORES.....	45
3. BIOELETRICIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL.....	48
3.1 CAPACIDADE DE GERAÇÃO	51
3.2 SELO ENERGIA VERDE	52
3.3 EXPORTAÇÃO PARA O SIN E CONSUMO	53
3.4 COMERCIALIZAÇÃO.....	55

3.5	POTENCIAL DE GERAÇÃO	56
3.6	ASPECTOS SOCIO AMBIENTAIS.....	57
4.	ELETRIFICAÇÃO DOS ACIONAMENTOS: ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ESTUDO DE APLICAÇÃO.....	58
4.1	ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE ACIONAMENTOS 60	
4.2	ESTUDO DE APLICAÇÃO	65
4.2.1	MOTORES ELÉTRICOS ASSÍNCRONOS OU DE INDUÇÃO TRÍFÁSICOS.....	65
4.2.1.1	MOTORES DE ALTO RENDIMENTO.....	69
4.2.1.2	MOTORES ASSÍNCRONOS EM PICADORES E DESFIBRADORES.....	71
4.2.1.3	MOTORES ASSÍNCRONOS EM MOENDAS	73
4.2.2.1	PARTIDAS DIRETAS	77
4.2.2.2	PARTIDAS POR SOFT STARTER.....	80
4.2.2.3	PARTIDAS POR CONVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	81
4.2.2.3.1	CONVERSORES EM SISTEMAS DE PREPARO E EXTRAÇÃO.....	85
4.2.2.3.1.1	CONVERSORES EM PICADORES E DESFIBRADORES.....	85
4.2.2.3.1.2	CONVERSORES EM MOENDAS	88
4.2.2.3.1.3	SISTEMAS HÍBRIDOS (PREPARO + MOENDAS).....	90
4.3	PROBLEMAS DE APLICAÇÃO – HARMÔNICOS.....	92
4.4	PRINCIPAIS GANHOS COM A ELETRIFICAÇÃO	95
4.5	PRINCIPAIS BARREIRAS PARA ELETRIFICAÇÃO.....	97
5.	ESTUDO DE CASO.....	98
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

CAPÍTULO 01

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica se tornou um dos principais insumos da sociedade moderna. O acesso à energia, a sua disponibilidade, preço e qualidade são fatores determinantes para a sobrevivência das sociedades tecnológicas de facilidades, bem estar e conforto. O mundo moderno é dependente de energia é praticamente impossível, pensar em crescimento e desenvolvimento sem o uso intensivo de energia elétrica.

O intenso desenvolvimento econômico, social e industrial verificado no Brasil nas últimas décadas, refletiu diretamente no aumento considerável da demanda de energia primária no país. Alinhado a estes fatores, crises hídricas diminuíram consideravelmente os níveis dos reservatórios das grandes usinas hidrelétricas, que representam a maior fonte geradora de energia no país. Termelétricas passaram a funcionar constantemente, para suprir a falta de energia representando um grande aumento nos custos de geração de energia elétrica.

Com isto, Grandes consumidores de energia elétrica, como indústrias eletro intensivas, se viram na necessidade de investir na produção da própria energia ou reduzir o consumo, com a utilização de equipamentos mais eficientes e otimização de processos.

Neste sentido, as usinas de Açúcar e Etanol se tornaram autossuficientes energeticamente, gerando sua própria energia ou boa parte dela, através do processo de geração de vapor pela queima do bagaço de cana em caldeiras. Não obstante, se tornaram também grandes exportadores de bioeletricidade, com a venda do excedente de energia gerada.

A bioeletricidade é uma energia limpa e renovável, feita a partir da biomassa: resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha), restos de madeira, carvão vegetal, casca de arroz, capim-elefante e outras. No Brasil, 80% da bioeletricidade vêm dos resíduos da cana-de-açúcar. Cada tonelada de cana-de-açúcar moída na fabricação de açúcar e etanol gera, em média, 250 kg de bagaço e 200 kg de palha

e pontas. Com alto teor de fibras, o bagaço de cana, desde a revolução industrial, tem sido empregado na produção de vapor e energia elétrica para a fabricação de açúcar e etanol, garantindo a autossuficiência energética das usinas durante o período da safra.

Até Abril de 2017, a bioeletricidade sucroenergética ofertada para a rede foi de 2.538 GWh, equivalente ao consumo anual de energia elétrica de mais de 1,3 milhão de unidades residenciais ou 16% da geração anual pela fonte carvão mineral. Desde 2013, o setor sucroenergético vem gerando mais energia elétrica para o SIN (Sistema Integrado Nacional) do que para o consumo próprio das unidades fabris, ficando, geralmente, numa relação 60% de energia para a rede e 40% para consumo próprio (ÚNICA - União da Indústria de Cana-De-Açúcar).

Em 2016, a geração de energia para a rede pela biomassa da cana respondeu por 4,6% do consumo nacional de energia elétrica no Brasil e representou aproveitarmos menos de 20% do potencial técnico da bioeletricidade sucroenergética daquele ano. Se aproveitarmos plenamente o potencial técnico da bioeletricidade da cana, segundo a EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas), somente esta fonte tem capacidade de representar 24% do consumo nacional na rede até 2024.

Neste contexto, torna-se necessário obter a maior eficiência nos ciclos térmicos do processo produtivo, de forma a maximizar a disponibilidade de vapor para a geração de energia elétrica e eliminando vapor para acionamento de máquinas de preparo e extração de cana-de-açúcar.

Além da redução do consumo de vapor e maior eficiência nos acionamentos, a eletrificação de sistemas de Preparo e extração traz outras vantagens intrínsecas à tecnologia, como aumento de produtividade e controle de processos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar análise de eficiência e estudo de aplicação na substituição de sistemas de acionamentos mecânicos por acionamentos elétricos em sistemas de preparo e extração de cana-de-açúcar, visando à eliminação de vapor em acionamentos de maquinários e consequente aumento da disponibilidade de vapor para geração de energia elétrica, aumentando assim a capacidade de geração de energia para consumo e exportação nas usinas de açúcar e etanol.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar um panorama do setor relacionado ao estudo no Brasil;
- Apresentar a eficiência dos Sistemas de acionamentos Mecânicos;
- Estudar a eficiência e aplicação dos Sistemas de acionamentos elétricos (eletrificação);
- Estudar os principais equipamentos e soluções utilizadas na eletrificação;
- Apresentar as principais vantagens e ganhos energéticos da eletrificação;
- Estudar os principais problemas de aplicação na eletrificação;

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com os dados apresentados no item 1.1 deste trabalho, o potencial de crescimento da bioeletricidade produzida pela cana-de-açúcar é gigantesco, pois se for plenamente explorado, a energia elétrica da cana capaz de ser “exportada” para a rede elétrica tem potencial estimado de 134 mil GWh/ano até 2020 (UNICA).

Utilizar plenamente esse potencial significaria proporcionar o atendimento anual de cinco cidades do tamanho de São Paulo, quase 87 cidades do porte de Ribeirão Preto ou 450 cidades do tamanho de Sertãozinho, considerando dados de consumo atual dessas cidades. Representaria quase o dobro da energia elétrica produzida no Estado de São Paulo em 2011 (UNICA).

A utilização de máquinas, equipamentos, sistemas e processos cada vez mais eficientes, com certeza irão ajudar a atingir os níveis de produção de energia estimados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho apresenta seis capítulos, sendo o primeiro a Introdução, com a Contextualização do Tema, Objetivos e Justificativa do trabalho. O segundo capítulo trata da Revisão Bibliográfica, que apresenta todos os conceitos teóricos referentes ao processo de produção de açúcar, etanol e energia elétrica em usinas, desde o ciclo de produção da cana-de-açúcar ao processo de cogeração de energia elétrica e vapor, abordando também as principais máquinas do processo de preparo e extração de caldo da cana-de-açúcar.

O terceiro capítulo apresenta a situação atual do Mercado Brasileiro de Bioeletricidade da cana-de-açúcar, com os principais números do mercado, principais usinas produtoras, localização e quantidade de energia produzida no país, bem como os principais aspectos ambientais. No capítulo quarto, é feita a análise de eficiência e aplicação dos principais equipamentos utilizados na eletrificação dos sistemas de preparo e extração de cana-de-açúcar, abordando também os ganhos energéticos e possíveis problemas e detalhes de aplicação.

No quinto capítulo é feito um estudo de caso de uma Usina no Interior do estado de São Paulo, apresentando todos os detalhes do processo de eletrificação, resultados e ganhos energéticos, de processo, otimização de produção e segurança. Também neste capítulo é apresentada a relevância financeira da utilização de motores de alto rendimento em projetos de eletrificação, com a análise dos custos de aquisição dos equipamentos versus os custos anuais de consumo de energia destes equipamentos.

Por último no sexto capítulo são apresentadas as considerações finais referentes ao estudo realizado.

CAPÍTULO 02

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – CONCEITO

De acordo com a EPE em seu PDE 2024 (Plano Decenal de Expansão de Energia), Eficiência Energética está associada à quantidade efetiva de energia final utilizada e não à quantidade mínima necessária para realização de determinado serviço ou produção de um bem, o que se aproximaria de um potencial técnico. O conceito de eficiência é aplicável tanto à manufatura, onde há um bem físico cujo conteúdo energético pode ser delimitado, quanto para serviços, onde a energia contida no serviço não é tão claramente definida, sendo mais próprio considerar a energia requerida mínima para a prestação do serviço.

2.2 CICLO DE PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Originária da espécie *Saccharum officinarum*, a cana-de-açúcar provém do território asiático, onde era semeada desde os tempos mais remotos. Com a ajuda de inovações tecnológicas ao longo dos anos, várias outras espécies foram produzidas, pois a planta original provocava várias enfermidades. A atual variedade surge do cruzamento genético entre da espécie primordial e mais quatro modelos alternativos do gênero *Saccharum* e consequentemente os arbustos resultantes foram, posteriormente recruzados com os espécimes iniciais, escolhidos como opção de cultivo. Foi assim que deste cruzamento genético de espécies surgiu a cana-de-açúcar conhecida e cultivada hoje, apresentada na figura 2.1



Figura 2.1: Cana-de-açúcar

Fonte: Embrapa

Devido às variações climáticas (temperatura, umidade relativa do ar e chuvas), solo e tratos culturais da cana-de-açúcar, a sua composição poderá apresentar diferentes teores de sacarose, açúcares redutores, fibras, compostos fenólicos, amido, ácidos aconíticos e minerais. A figura 2.2 apresenta os principais componentes da cana-de-açúcar:

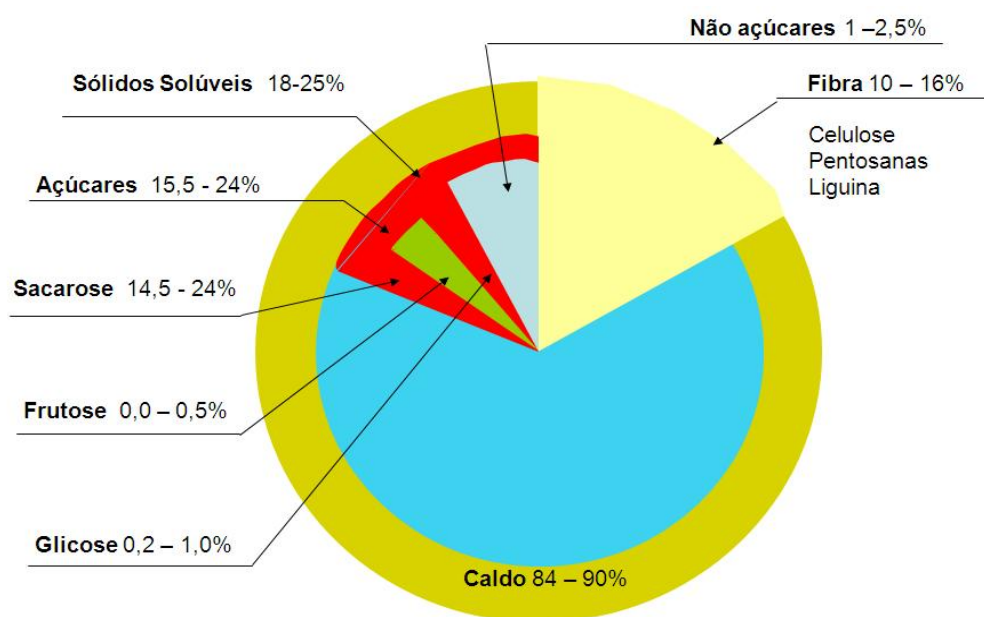


Figura 2.2: Composição da cana-de-açúcar

Fonte: Usina São Fernando

Após o plantio, a cana-de-açúcar é classificada como uma cultura semiperene, visto que esta é cortada várias vezes, antes de ser novamente replantada. Em média o ciclo produtivo desta planta, é uma média de seis anos com cinco cortes. Em sua fase de plantio.

Melhoramento genético, técnicas de plantio, gerenciamento agrícola, colheita e tratos culturais, são as principais tecnologias com grande potencial para contribuição no aumento de produtividade de sustentabilidade da cana-de-açúcar.

De acordo com Macedo et al (2004), existem duas opções de utilização para a época de plantio da cana:

- **Cana de 12 meses:** a cana é plantada pouco tempo após a última colheita e será colhida no ano seguinte; nesta opção, a terra será sempre

cultivada com cana, mas a produtividade é mais baixa, por isso ela só é adotada em cerca de 20% dos casos;

- **Cana de 18 meses:** após a última colheita do canavial, a terra fica vários meses descansando ou recebe uma cultura de rotação de amendoim, soja, girassol ou algum vegetal que ajude a nitrogenar o solo; neste caso, a produtividade do primeiro corte é muito mais alta, mas haverá um espaço de cerca de dois anos entre o último corte do ciclo anterior e o primeiro corte do novo ciclo.

Após o primeiro corte, que corresponde à chamada cana-planta, o canavial é colhido em média mais quatro vezes (cana soca) a partir da rebrota da cana cortada (soqueira). Na tabela 2.1 é apresentado um ciclo padrão de corte, representado por valores médios de cerca de 100 usinas da região Centro-Sul, nas safras de 1998/99 a 2002/03.

Tabela 2.1: Ciclo padrão de corte da cana-de-açúcar

Corte	Produtividade em Área colhida (t/ha)
1º Cana-planta (18 meses)	113 (80%)
1º Cana-planta (12 meses)	77 (20%)
2º (1a. soca)	90
3º (2a. soca)	78
4º (3a. soca)	71
5º (4a. soca)	67
Média de cinco cortes	82,4 t/ha

Fonte: I.C. Macedo et al (2004)

Sendo assim, a produtividade média em área colhida é de 82,4 t/ha, e em área plantada (5 cortes, 6 anos) é de 68,7 t/ha/ano, sendo colhida normalmente entre fins de Março e começo de Dezembro no estado de São Paulo

A planta pode ser cultivada em todo do território nacional. Contudo, as áreas de maior cultivo, sobretudo por questões climáticas, são as regiões Centro-Sul e Nordeste, sendo o primeiro detentor de 89% de toda produção nacional. O Estado de São Paulo é responsável por aproximadamente 60% deste montante, seguido

de Paraná e Minas Gerais com participação em torno de 8% e 7%, respectivamente.

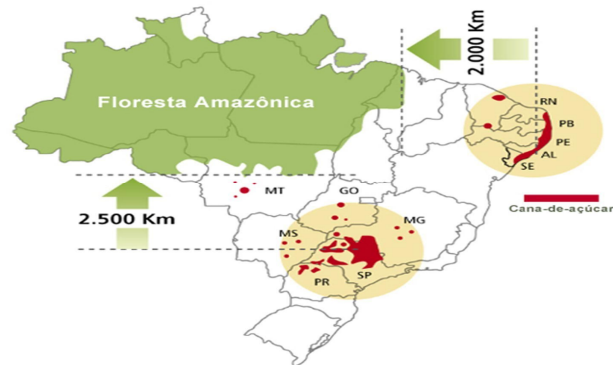


Figura 2.3: Distribuição da produção de cana-de-açúcar no Brasil

Fonte: ÚNICA

2.3 SETORES DE UMA USINA RELACIONADOS AO ESTUDO

A planta industrial de um modo geral pode ser dividida nas seguintes seções, descritas a seguir: **recepção, preparo, moagem, tratamento do caldo, fábrica de açúcar, destilaria de etanol, utilidades, disposição de efluentes e estocagem dos produtos**. A Figura 2.4 mostra um diagrama de blocos do processamento da cana.

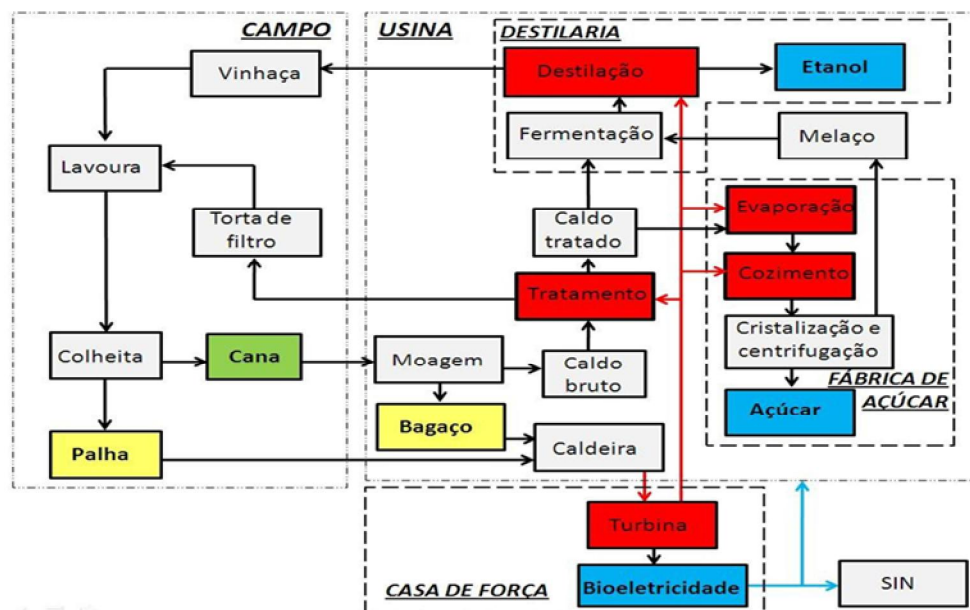


Figura 2.4: Diagrama de blocos para o processamento de cana

Fonte: ÚNICA

2.3.1 RECEPÇÃO E PREPARO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Neste sector da planta industrial que tem como principais equipamentos Picadores e Desfibradores, a cana recebida é amostrada aleatoriamente para se avaliar a sua qualidade, analisando-se o teor de sacarose, fibra e pureza do caldo. Toda cana colhida (corte manual) é lavada para diminuir as impurezas que afetam de forma negativa o seu processamento. Em caso de cana picada, (corte mecanizado), a cana não pode ser lavada, podem-se ter perdas consideráveis de sacarose. Por este motivo, algumas usinas passaram a utilizar o sistema de limpeza a seco, que consiste em jatos de ar sobre a cana.

Após a fase de recepção, através de esteiras transportadoras, a cana é transportada para os equipamentos de preparo, onde normalmente existem dois conjuntos de facas, que têm a finalidade de picar a cana, quando inteira ou nivelar a camada de cana na esteira, facilitando o trabalho do Desfibrador.

De acordo com HUGOT, 1977, o preparo da cana-de-açúcar tem como objetivos o aumento da capacidade e da eficiência de extração, através:

- Da destruição da resistência das partes duras, exigindo menor pressão das moendas;
- Para a extração desejada e, conseqüentemente, menor desgaste;
- Do rompimento dos vasos celulares, para uma maior exposição das células à ação das moendas ou ao desfibramento;
- Da produção de uma massa fibrosa, densa e homogênea, diminuindo espaços vazios nas esteiras, aumentando-se assim a capacidade de extração.

2.3.1.1 PICADORES (FACAS ROTATIVAS) E DESFIBRADORES

Os **Picadores ou Facas Rotativas** são conjuntos de facas que realizam o corte da cana proveniente de colheita manual e retiram impurezas da parte externa da cana que atrapalham o processo de extração. Normalmente estes equipamentos são constituídos pelas seguintes partes:

- Base de concreto: objetivo de dar apoio ao jogo de faca;
- Base metálica e mancais;

- Eixo de aço carbono;
- Suporte das facas em aço carbono e facas: destinado a fixar as facas;
- Cofre protetor em chapa de aço carbono;
- Volante de aço carbono.

As lâminas são de aço carbono especial, característica que lhes dá durabilidade, resistência, elasticidade, tenacidade e boa têmpera. O revestimento especial com solda dura permite a boa execução do trabalho de preparo.

As facas rotativas apresentadas na figura 2.5 são classificadas em niveladoras e cortadoras. As niveladoras têm por função regularizar e uniformizar o fluxo da carga de cana que cai desordenadamente na esteira. São em menor número e as suas pontas ficam mais distantes do fundo da esteira, cortando a cana em toletes.

As cortadoras são em maior número e estão com a ponta mais próxima do fundo da esteira. As facas cortadoras cortam com mais intensidade as canas, reduzindo aquela massa grosseira em uma camada densa e uniforme de pequenos pedaços da matéria-prima. As facas rotativas em sua maioria são acionadas por turbina a vapor.

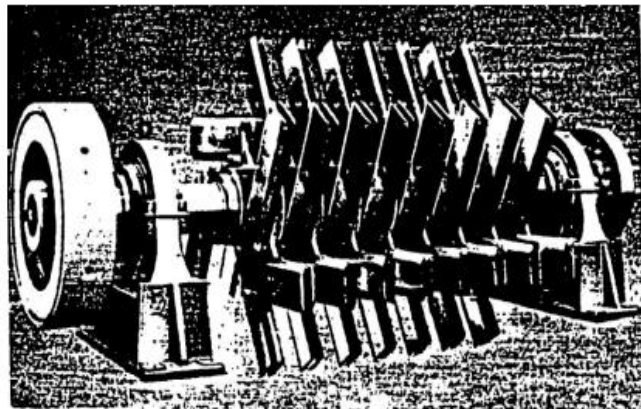


Figura 2.5: Facas Rotativas

Fonte: HUGOT, 1977

O Desfibrador é composto de um rotor central, constituído de eixo de aço, suportes e martelos, de um tambor alimentador e de uma placa desfibradora, conforme apresentado na figura 2.6. Os suportes dos martelos têm a forma triangular. Nas pontas dos triângulos passam os eixos ou varões os quais prendem os martelos que trabalham de forma oscilante. Na parte anterior e superior do rotor

central é instalado um tambor alimentador de grande diâmetro, nervurado, que tem por função conduzir a cana entre o rotor central e a placa desfibradora.



Figura 2.6: Desfibrador de Cana-de-açúcar

Fonte: DEDINI Indústrias de base

A placa desfibradora, localizada na parte posterior do rotor central, é de aço fundido, de forma curvada, mostrando nervuras recobertas de solda dura. Esta placa está assentada distante dos martelos em cerca de 5 a 7 mm. Todo o conjunto é protegido por um cofre de chapa protetor.

O desfibrador é assentado na parte inclinada do esteirão, após um jogo de facas rotativas. Tal equipamento promove o rompimento das células, conseguindo-se entre 90 a 94% de células abertas, melhor expondo o caldo ao processo seguinte de extração, por este estar agora absorvido pela fibra e não mais encerrado dentro de uma célula do parênquima de armazenamento. A eficiência do desfibrador é mais importante no processo de extração por difusão do que por moagem. Esta operação eleva a eficiência de extração em cerca de 5%, o que corresponde à instalação adicional de um terno de moenda.

A utilização de Picadores e Desfibradores garantem ao processo as seguintes vantagens:

a) Aumento da eficiência das moendas:

- **Em capacidade:** massa de cana moída em toneladas por hora (10 a 30%);
- **Em extração:** porcentagem de pol(caldo) extraída em relação à pol (cana) (5 a 10%);

- b) Aumento da densidade do colchão de cana, o que representa aumento da capacidade pela diminuição de espaços vazios a serem processados.
- c) Permite a utilização de menores pressões hidráulicas, uma vez que o caldo está exposto pelo rompimento das células.
- d) Contribui para uma melhor homogeneização do colchão de cana;
- e) Ocasiona a melhoria das condições absorptivas do bagaço em função da diminuição do tamanho das fibras e, conseqüentemente, do aumento da superfície de absorção.
- f) Permite um menor desgaste das moendas.
- g) Permite aumentar a velocidade das moendas.
- h) Uniformiza a fibra.

2.3.2 MOAGEM E EXTRAÇÃO DE CALDO

Neste sector da planta industrial é feita a extração dos açúcares contidos na cana. No Brasil esta extração é feita na sua maioria por Moagem, através de equipamentos denominados Ternos de Moenda. O processo de extração também pode ser feito por difusão, porém este processo é pouco utilizado no Brasil.

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, como também produzir 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 em série. Após a passagem pelo primeiro destes ternos, a proporção de caldo em relação à fibra cai de aproximadamente sete para algo entre 2 a 2,5, ficando difícil extrair este caldo residual; o artifício usado é o que se chama 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. A eficiência de extração de açúcares varia de 94,0% a 97,5% e a umidade final do bagaço é em torno de 50% (NovaCana).

2.3.2.1 MOENDAS

Conjunto de 04 rolos de moenda dispostos de maneira a formar aberturas entre si, sendo que 03 rolos giram no sentido horário e apenas 01 no sentido anti-horário, conforme ilustrado na figura 2.7. A principal função das Moendas é forçar a cana a passar entre os rolos, de maneira separar o caldo contido no bagaço.

Os rolos são posicionados de forma triangular. Os rolos inferiores trabalham rigidamente em suas posições, enquanto o superior trabalha sob o controle de uma pressão hidráulica. Abaixo são apresentadas as principais funções de cada um dos rolos dos ternos de Moenda:

- 1) **Rolo de Pressão:** encontra-se na parte superior do termo logo acima do rolo inferior de entrada. Sua função é compactar a camada de cana permitindo uma melhor alimentação do termo.
- 2) **Rolo Superior:** está localizado na parte superior do castelo, entre o rolo de entrada e o rolo de saída, gira no sentido anti-horário. É muito importante no conjunto de ternos devido ao maior contato com a cana. Também recebe a força através do acoplamento e transmite aos demais rolos por intermédio dos rodetes.
- 3) **Rolos Inferiores:** em cada terno de moenda temos 02 rolos, um de entrada e outro de saída. A função do de entrada é fazer uma pequena extração de caldo e direcionar a cana na abertura de saída.



Figura 2.7: Rolos de um terno de Moenda

Fonte: DEDINI Indústrias de base

O equipamento de um modo geral é constituído pelas principais partes:

- **Base metálica;**
- **Castelo:** são as estruturas que sustentam os cilindros esmagadores, sendo assentados cada um, na sua base metálica; construídos de ferro ou aço fundido;
- **Mancais:** são peças destinadas a suportarem os eixos das moendas, são construídas em bronze e assentadas nas fendas dos castelos;
- **Cilindros ou rolos:** são constituídos de eixo de aço especial revestido centralmente por camisas frisadas de ferro fundido. O cilindro superior é responsável pelo acionamento dos dois inferiores (rola cana e rola bagaço) através de engrenagens (rodetes) colocadas nas duas extremidades dos eixos;
- **Pentes:** têm por função manter limpos os frisos das camisas dos cilindros, após o esmagamento;
- **Bagaceira:** localizada entre os dois cilindros inferiores e sob o cilindro superior. Tem por função manter limpos os frisos do cilindro inferior (rola cana) e facilitar a condução da cana parcialmente esmagada para o segundo esmagamento que ocorre entre o cilindro inferior (rola bagaço) e superior

As moendas são acionadas por turbinas a vapor, acopladas a redutores para movimentar o rolo superior à uma velocidade de 3,5 a 8 RPM(Rotações por Minuto).

A eficiência de um terno de moenda pode ser medida por dois parâmetros: capacidade e eficiência de extração. Entende-se por capacidade de um terno de moagem a quantidade de cana moída por unidade de tempo. Ela pode ser expressa em TCH (tonelada de cana por hora) ou TFH (tonelada de fibra por hora).

Os fatores que afetam a capacidade de moagem são:

- Preparo de cana;
- Uniformidade de alimentação;
- Fibra da cana;
- Texturas das camisas;

- Velocidade das moendas;
- Automatismo do sistema de alimentação;
- Regulagem da bagaceira;
- Direção e elemento humano.

Entende-se por **eficiência de extração** a quantidade de sacarose extraída da cana pelas moendas. Pode-se avaliar da seguinte forma:

- Porcentagem de caldo misto extraído da massa de cana processada;
- Porcentagem caldo extraído da massa de cana processada;
- Sacarose (porcentagem de pol (caldo), extraída da sacarose presente na cana);
- Sacarose perdida no bagaço por cento de fibra existente na cana.

Normalmente utiliza-se a relação entre sacarose extraída (no caldo misto) e sacarose da cana:

$$Ef (\%) = \frac{Pol(caldo)*massa(caldo)}{Pol(cana)*massa(cana)} * 100\% (1)$$

Onde:

Pol (Caldo) = porcentagem de sacarose aparente no caldo;

Pol (Cana) = porcentagem de sacarose aparente na cana;

2.3.3 BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Biomassa é toda a matéria orgânica proveniente de florestas, esgotos domésticos e resíduos industriais. A Biomassa representa hoje a uma das fontes de energia renovável mais expressiva, correspondendo a cerca de 15,7% da produção de energia renovável no Brasil, dentre um total de 39,4% (BEN – Balanço Energético Nacional).

É considerada renovável, pois sua renovação ocorre através do ciclo do carbono. Através da queima da biomassa ou de seus derivados, ocorre a liberação de CO₂ na atmosfera. As plantas, através do processo da fotossíntese, transformam esse CO₂ em hidratos de carbono, liberando oxigênio. Assim, a utilização da biomassa, desde que não seja de forma predatória, não altera a composição da atmosfera.

O ONS define biomassa como qualquer matéria orgânica que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo).

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto fibroso resultante da moagem da cana e que pode ter diversos usos, desde a produção de energia através da queima, até incorporação ao solo ou como parte integrante da dieta bovina. Mesmo após a extração da sacarose e outros nutrientes, o bagaço ainda contém muita matéria orgânica, sendo assim uma possível fonte de mais energia e de outros produtos de química fina (SOARES, 2012).

De acordo com a ÚNICA, a produção de Biomassa (bagaço de cana e palha) nas usinas é diretamente proporcional à quantidade de cana processada. Na tabela 2.2 é apresentada a relação de equivalências típicas entre a quantidade de cana processada e a biomassa correspondente produzida.

Tabela 2.2 - Produção de biomassa por quantidade de cana processada

Cana processada	Biomassa correspondente
1 t cana	250 kg bagaço
1 t cana	200 kg palha

Fonte: UNICA

Estes valores podem variar em função da época e da região da colheita. Entretanto, o que se observa entre as usinas é uma pequena variação, o que leva a crer que estes dados podem ser considerados de forma confiável para estimativa da quantidade de biomassa produzida durante uma safra, a partir da quantidade de cana-de-açúcar processada durante o período.

Cabe salientar que a colheita da cana-de-açúcar tem seu período de safra e entressafra. No estado de São Paulo, o período de safra geralmente é entre os meses de Abril a Novembro de cada ano. Portanto, para levantamento da biomassa produzida deve ser considerada a produção durante este período, onde a cana é processada.

Após a extração do caldo, o bagaço, constituído de fibras (46%), água (50%) e sólidos dissolvidos (4%), é transportado por esteiras rolantes para as caldeiras, sendo o excedente enviado ao pátio de estocagem. O bagaço é produzido numa quantidade que varia de 240 kg a 280 kg por tonelada de cana moída; ele se constitui no único combustível utilizado nas caldeiras a vapor, gerando toda energia necessária ao processamento de cana e, ainda, produzindo energia excedente, que varia, na maioria dos casos, entre zero e 10% e esta energia é destinada para exportação (ÚNICA).

2.4 PROCESSO DE COGERAÇÃO DE EM UMA USINA DE CANA DE AÇUCAR E ETANOL

2.4.1 COGERAÇÃO

Define-se como Cogeração o processo de produção sequencial e simultâneo de duas ou mais formas de energia, térmica e mecânica ou elétrica, a partir de um único combustível.

Devido à necessidade de consumo de vapor de água, água quente ou gelada em vários processos industriais, bem como a necessidade de energia mecânica ou elétrica, os sistemas de cogeração vêm sendo utilizados amplamente. A figura 2.8 apresenta os principais componentes de um sistema de cogeração, produzindo energia elétrica e vapor para processos industriais:

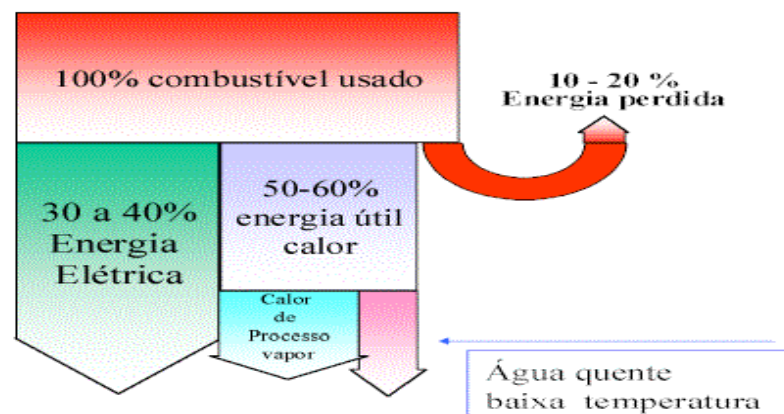


Figura 2.8: Diagrama de Cogeração

Fonte: INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética).

Pode-se assim perceber que o processo de cogeração é uma ação de uso racional do potencial energético de determinados combustíveis, uma vez que o

processo de geração de energia é elevado a partir da produção combinada e sequencial de duas ou mais formas de energia, dando um melhor aproveitamento no conteúdo energético do combustível básico.

Os setores industriais apresentados na figura 2.9 geram resíduos que normalmente são utilizados em grande escala como combustíveis em sistemas de cogeração:

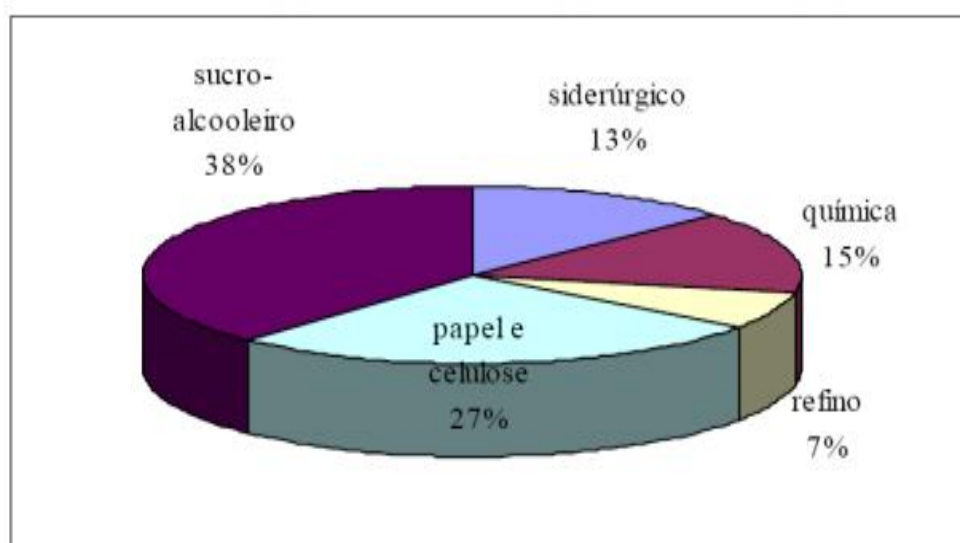


Figura 2.9: Setores Indústrias com Sistemas de Cogeração
Fonte: INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética).

Pode-se assim observar o grande potencial de cogeração existente em usinas de açúcar e etanol, superando setores como Papel e Celulose, Químico e Siderúrgico.

2.4.2 COGERAÇÃO POR BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Em grande parte das usinas de açúcar e etanol no Brasil, os sistemas de cogeração têm como único combustível o bagaço de cana-de-açúcar que é queimado em grandes caldeiras, gerando vapor de água em alta pressão e temperatura.

O vapor sai das caldeiras na pressão de 22 bar e temperatura de 300 °C; nessas condições, ele é expandido em turbinas de contrapressão até 2,5 bar, turbinas estas que acionam os principais equipamentos mecânicos da usina (Picadores, Desfibradores e Moendas), bem como os geradores de energia

elétrica, que é fornecida para os vários setores da indústria e o excedente é exportado para o SIN. O vapor a 2,5 bar, denominado de vapor de escape, é ajustado para a condição de saturação e enviado para o processo, fornecendo toda a energia térmica necessária na produção de açúcar e etanol.

Os sistemas de cogeração tornaram-se fundamentais para as usinas de açúcar e etanol, pois além de atenderem as necessidades de energia térmica para o processo e mecânica para acionamentos, usa o resíduo bagaço de cana-de-açúcar, sobra do processo de extração do caldo, como combustível, conforme ilustrado na figura 2.10.

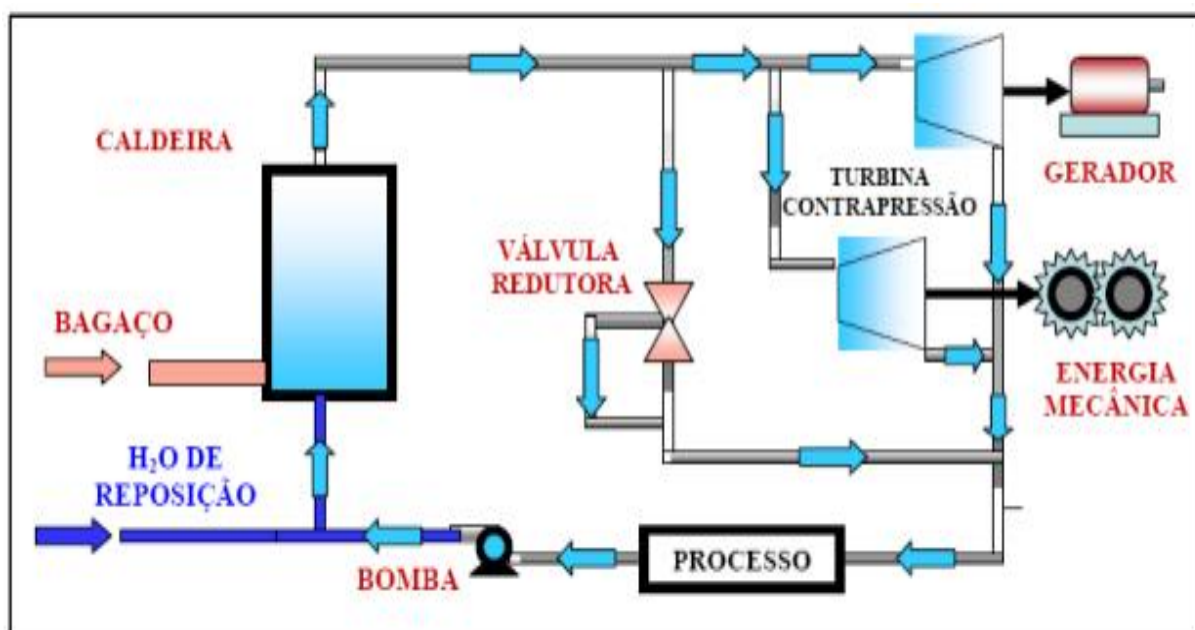


Figura 2.10: Sistema de Cogeração típico em Usinas de açúcar e Etanol

Fonte: Pessine (2008, apud, DANTAS, 2008, p.50).

2.4.2.1 BALANÇO TÉRMICO E DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR NA USINA

Existem vários arranjos para circuitos térmicos em usinas de açúcar e etanol. É possível ampliar o potencial de geração de bioeletricidade nas usinas, fazendo o uso da energia térmica do vapor gerado, bem como melhorar o consumo interno de vapor na usina.

As figuras 2.11 e 2.12 apresentam as duas configurações mais utilizadas em usinas, uma representando sistemas utilizados na maior parte das usinas antigas e outra apresentando os sistemas utilizados nas usinas mais modernas.

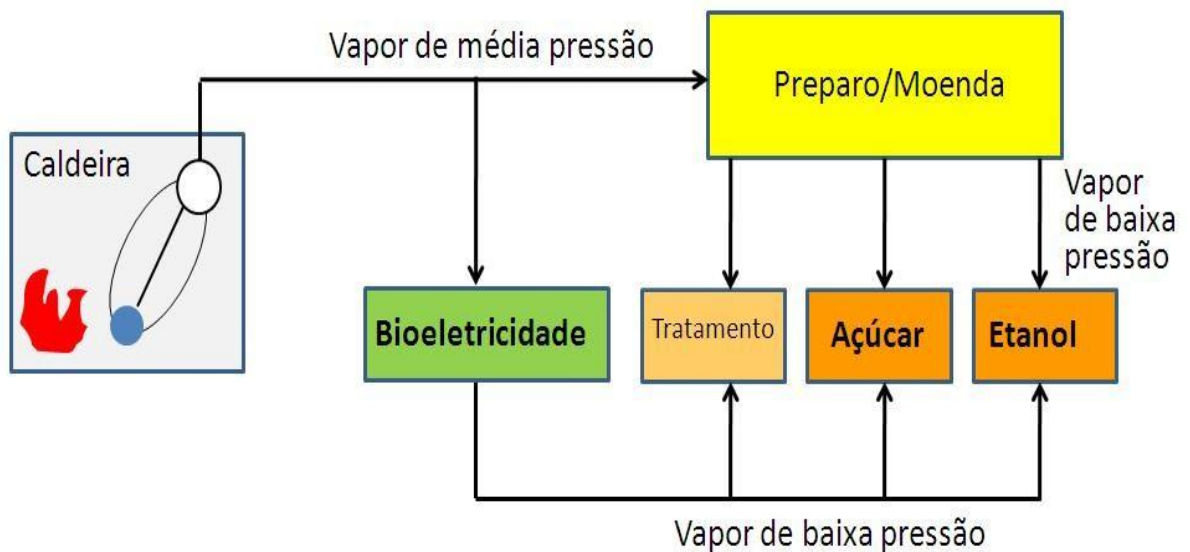


Figura 2.11: Balanço térmico em Usinas antigas

Fonte: SANTOS, 2012.

O balanço térmico apresentado na figura 11, representando a maior parte das usinas instaladas no Brasil, o vapor é utilizado no acionamento dos sistemas de preparo e extração da cana-de-açúcar, através de turbinas a vapor, que acionam Picadores ou Facas Rotativas, Desfibradores e Ternos de Moenda.

Após a passagem do vapor por entre os estágios da turbina, este perde pressão e temperatura. Estas turbinas são, então, projetadas para que a condição de vapor no seu escape seja útil para alimentação do processo de fabricação de açúcar e etanol. Este é o vapor de baixa pressão. Considerando que as turbinas de acionamentos mecânicos não disponibilizam vapor suficiente para suprimento do processo fabril, também são utilizadas turbinas de geração de energia elétrica para aproveitar a energia do restante do vapor necessário para o processo industrial (SANTOS, 2012)

Acontece que estas turbinas possuem baixa capacidade de geração de bioeletricidade, pois o fluxo de vapor é pequeno e o nível de pressão de vapor (média pressão) limita o potencial de geração, em comparação com linhas de vapor de alta pressão. Neste caso, a energia elétrica produzida será utilizada apenas para consumo interno da indústria. (SANTOS, 2012)

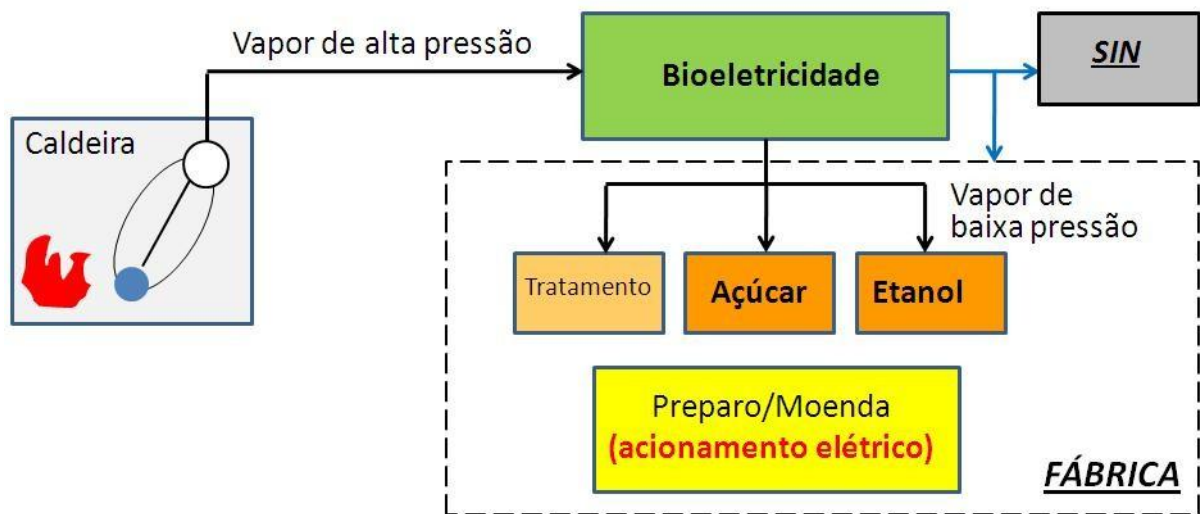


Figura 2.12: Balanço térmico em Usinas modernas

Fonte: SANTOS, 2012.

Já na figura 2.12, onde se tem a representação do balanço térmico de Usinas modernas, as caldeiras são geralmente de alta pressão para favorecer a geração de bioeletricidade. Todo vapor de processo pode passar pela turbina. Isto significa que, nesta nova condição, toda energia potencial contida no vapor é aproveitada para conversão em energia mecânica no eixo da turbina que, com a contribuição de um gerador síncrono, produzirá bioeletricidade.

O preparo e a moenda não carecem mais de vapor, pois os acionamentos são feitos via motores elétricos. Ou seja, as usinas modernas que utilizam este esquema térmico cogeram, produzindo um volume significativo de bioeletricidade com baixo consumo de vapor tendo em vista o incremento de energia da caldeira (devido à elevação da pressão e temperatura) e o aproveitamento energético de todo vapor no turbogerador. Neste caso, as usinas produzem energia elétrica suficiente para suprimento de toda indústria e ainda são capazes de exportar excedentes de energia (SANTOS, 2012).

Atualmente a energia elétrica já é considerada o terceiro produto das usinas de açúcar e etanol. A capacidade instalada a partir da biomassa da cana é responsável pela 3ª posição na matriz elétrica brasileira, com 11.205 MW, se aproximando da potência a ser instalada na usina Belo Monte (ÚNICA).

2.4.3 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS NOS SISTEMAS DE COGERAÇÃO EM USINAS

Dentre os principais equipamentos de um sistema de cogeração em uma usina de açúcar e etanol, destacam-se os seguintes: Caldeira geradora de vapor, Turbina, Gerador Síncrono e sistema de condensação. Os tópicos a seguir irão abordar os principais conceitos por trás destes equipamentos.

2.4.3.1 CALDEIRAS

Caldeiras ou Geradores de vapor são equipamentos que utilizam energia química proveniente dos processos de combustão de um combustível, para realizar a mudança de fase da água do estado líquido para vapor, a determinados níveis de pressão e temperatura. Este vapor gerado pode ser utilizado para suprir a demanda térmica de indústrias em processos Industriais, bem como poderá também ser utilizado para acionamento de máquinas e geração de eletricidade.

Na figura 2.13, tem-se representada de forma simplificada uma caldeira de vapor, destacando os dois de seus principais componentes: a fornalha onde ocorrem a combustão do combustível e as superfícies de aquecimento, onde o fenômeno de troca de calor entre o fluido de trabalho, no caso à água e os gases quentes.

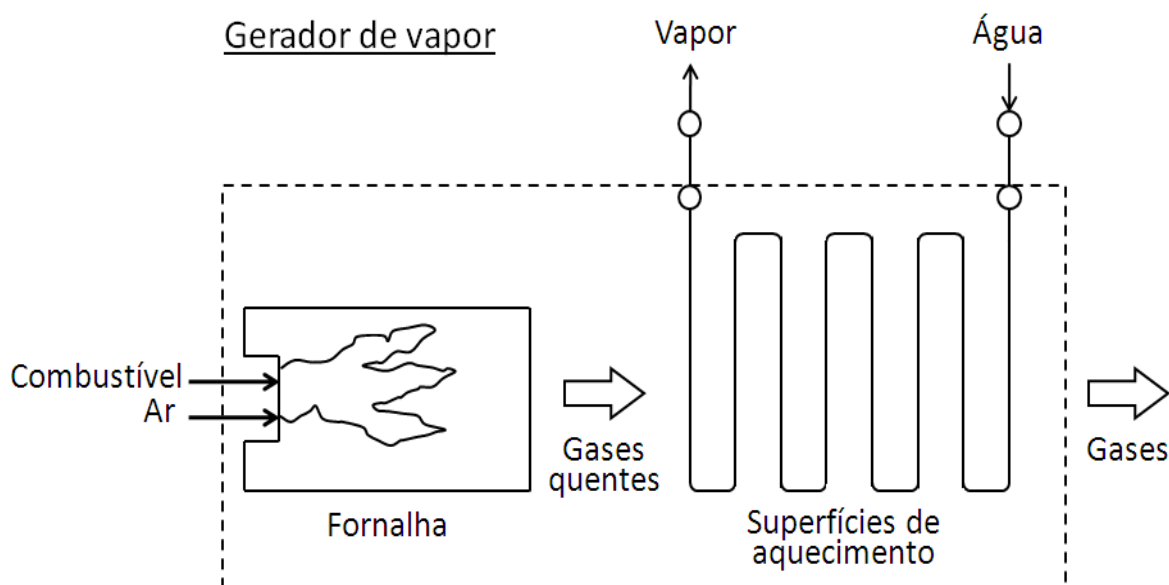


Figura 2.13: Esquema Simplificado de uma caldeira

Fonte: LORA e NASCIMENTO, 2004.

De acordo com SANTOS, 2012, as caldeiras são classificadas de acordo com os critérios apresentados abaixo:

- **Aplicação principal:**
Centrais termelétricas, uso industrial ou propulsão naval.
- **Disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho:**
 - Caldeiras flamotubulares ou pirotubulares – os gases fluem por dentro de tubos imersos em água;
 - Caldeiras aquotubulares – a água circula pelo interior dos tubos e os gases trocam calor com a água através da parede dos mesmos.
- **Força motriz para a circulação do fluido de trabalho:**
 - Circulação natural – a circulação do fluido de trabalho pelo interior dos tubos ocorre devido à diferença de densidade da água líquida e a mistura água-vapor;
 - Circulação forçada – são utilizadas bombas de recirculação;
 - Passe único – a água é forçada por bomba de alimentação a passar uma única vez pela tubulação. Não há recirculação de água neste caso.
- **Nível de pressão de operação:**
 - Classificadas em baixa, média, alta, super alta e supercrítica.
- **Tipo de combustível ou fonte de calor:**
 - Sólidos, como biomassa, carvão mineral, resíduos urbanos, etc.;
 - Líquidos, como óleos combustíveis;
 - Gasosos, como gás natural, gás de processo e calor residual.
- **Processo de combustão:**
 - Grelha fixa ou rotativa – próprio para queima de biomassa ou resíduos agroindustriais;
 - Queima em suspensão – para combustível sólido pulverizado, óleo combustível e gás natural;
 - Leito fluidizado (borbulhante ou circulante) – para queima de combustíveis sólidos em geral.
- **Organização da tiragem de ar e gases de combustão:**
 - Tiragem natural – exercida exclusivamente pela chaminé. Típica de caldeiras antigas de pequeno porte;
 - Tiragem forçada – exercida por sopradores que pressurizam o ar para combustão e facilitam a remoção dos gases pela chaminé;
 - Tiragem induzida – realizada por ventiladores de exaustão, gerando uma pressão ligeiramente negativa no interior da fornalha;

- Tiragem balanceada – uma combinação da tiragem forçada com a tiragem induzida.
- **Disposição da fornalha e superfície de aquecimento:**
 - Pode ser de diversos tipos como, por exemplo, em forma de M, forma de T, em forma de U ou em forma de torre.

2.4.3.1.1 CALDEIRAS TÍPICAS DE UMA USINA DE AÇÚCAR E ETANOL

Em usinas de açúcar e etanol são comumente aplicadas caldeiras Aquotubulares, porque o fluxo de vapor e a taxa de produção por calor são maiores em relação às caldeiras flamotubulares.

Estas caldeiras são projetadas para gerar vapor superaquecido, em alta pressão e temperatura, com o objetivo de se obter maior aproveitamento da energia do vapor, medida pela Entalpia, para geração de eletricidade nos turbogeradores. Estes sistemas requerem vapor superaquecido por este possuir um maior conteúdo energético e estar isento de condensado (água no estado líquido), que pode provocar danos à turbina.

O sistema de circulação adotado é o sistema forçado por bomba de recirculação. Isto resulta em caldeiras mais compactas já que o fluido de operação fica submetido à alta pressão, permitindo diâmetros menores dos tubos de circulação. A tecnologia de combustão empregada, geralmente, é a de grelha fixa, basculante ou rotativa, própria para queima de biomassa (SANTOS, 2012).

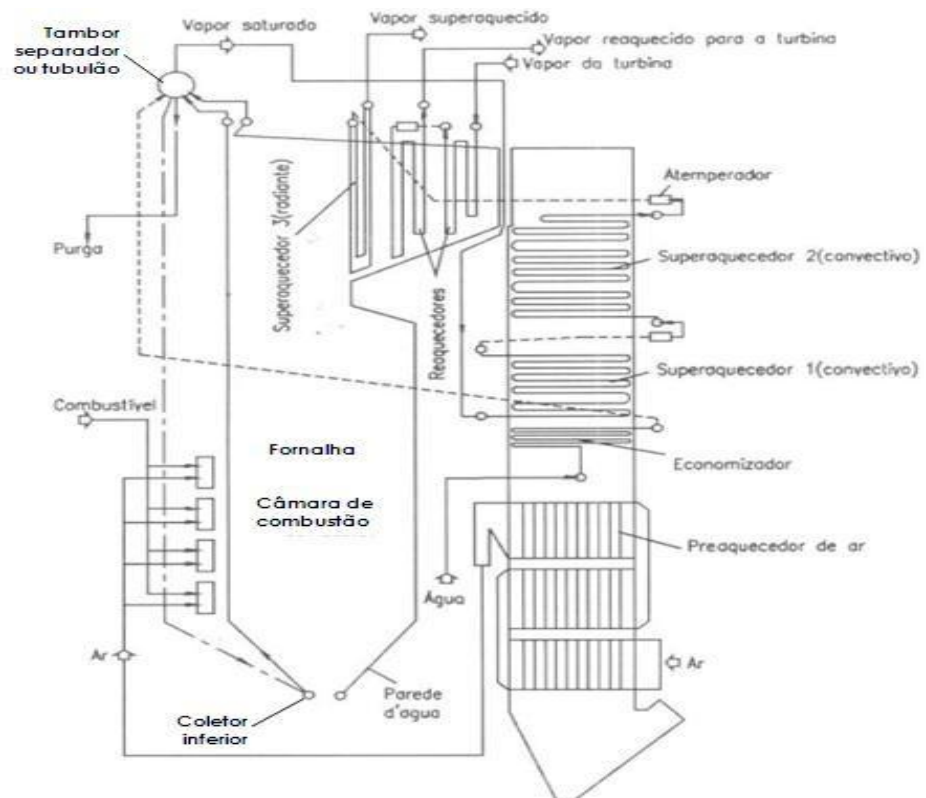


Figura 2.14: Caldeira Aquotubular

Fonte: LORA e NASCIMENTO, 2004.

2.4.3.2 TURBINAS À VAPOR

Turbinas a Vapor são equipamentos térmicos rotativos em que a energia térmica do vapor é transformada em energia cinética devido a sua expansão através dos bocais. A energia cinética tende a gerar movimento no rotor da turbina, ocasionando energia mecânica que pode ser utilizada para acionamento de equipamentos diversos, como bombas, ventiladores, compressores, moendas, picadores, ou para acionamento de geradores síncronos para geração de eletricidade. O princípio de funcionamento de uma turbina a vapor consiste na atuação do vapor através de um injetor sobre as palhetas móveis fixadas ao eixo da turbina, conforme apresentado na figura 2.15.

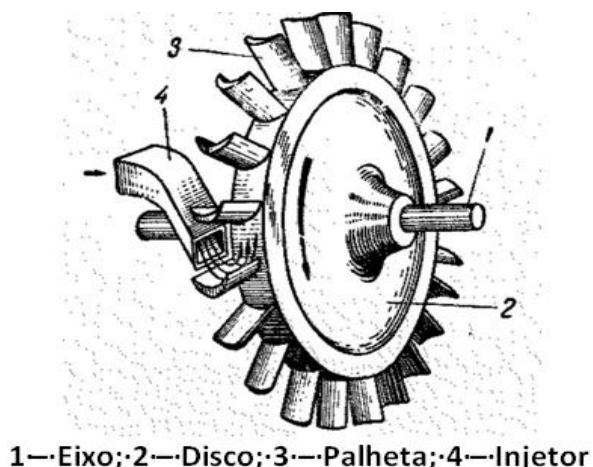


Figura 2.15: Componentes de uma Turbina

Fonte: SHLYAKHIN, 1994

Uma grande vantagem das turbinas a vapor é a possibilidade da utilização da energia térmica do vapor em processos industriais através de extrações reguláveis na sua seção de fluxo após o aproveitamento de parte deste potencial térmico do vapor para geração de energia mecânica no eixo. Ou seja, a turbina a vapor pode ser utilizada como geradora de energia térmica e mecânica (ou elétrica quando do acionamento de gerador síncrono) simultaneamente, caracterizando o processo de cogeração (SANTOS, 2012).

Assim como motores elétricos, as turbinas a vapor também são basicamente constituídas por um rotor e um estator. O rotor é a parte móvel da máquina, responsável pela transmissão de energia cinética gerada, ao passo que o estator é a parte fixa. O estator é composto pela carcaça que suporta o palhetamento fixo, responsável pelo direcionamento e injeção do vapor no palhetamento móvel do rotor. As palhetas fixas podem ser encaixadas diretamente na carcaça principal ou montadas em anéis-suportes presos à carcaça. Estes anéis-suportes chamam-se porta-palhetas.

As turbinas a vapor podem ser classificadas como turbinas de simples estágio ou turbinas multiestágios. Nas turbinas de simples estágios existe somente um único estágio de palhetas composto por um anel de palhetas fixas e um anel de palhetas móveis. As turbinas de multiestágios possuem duas ou mais fileiras de estágios, dependendo das condições de vapor na entrada e saída da turbina e da

requisição de potência no eixo (SANTOS, 2012). Um rotor de múltiplos estágios com palhetas móveis fixadas ao eixo é apresentado na figura 2.16.

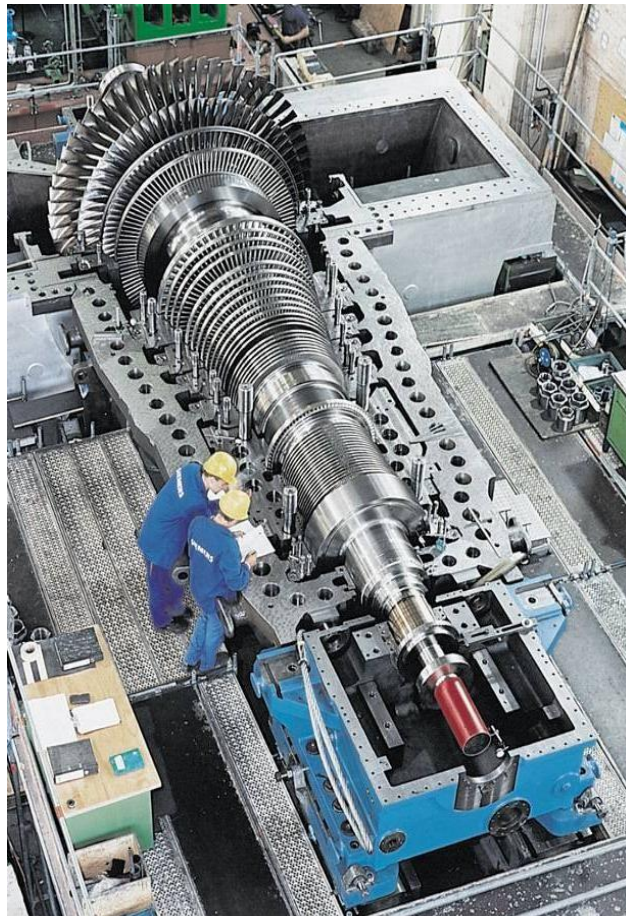


Figura 2.16: Rotor de uma turbina Multiestágios

Fonte: SIEMENS Ltda.

Considerando a expansão do vapor dentro da turbina multiestágios, as palhetas dos primeiros estágios possuem dimensões menores em relação às dos últimos estágios, visto que na entrada da turbina o vapor está nas condições de pressão, temperatura e volume específico reduzido.

À medida que o vapor passa por entre os estágios, convertendo sua energia térmica em energia cinética, existe uma perda de pressão e temperatura o que eleva o volume específico do vapor e, por esse motivo, as palhetas dos últimos estágios são maiores que as da entrada da turbina. Uma turbina multiestágios pode possuir milhares de palhetas (SANTOS, 2012).

2.4.3.2.1 TURBINAS TÍPICAS EM USINAS DE AÇÚCAR E ETANOL

Devido à necessidade de geração de vapor para os processos e geração de eletricidade, as usinas de açúcar e etanol têm utilizado turbinas de condensação com extração, que têm seu esquemático apresentado na figura 2.17.

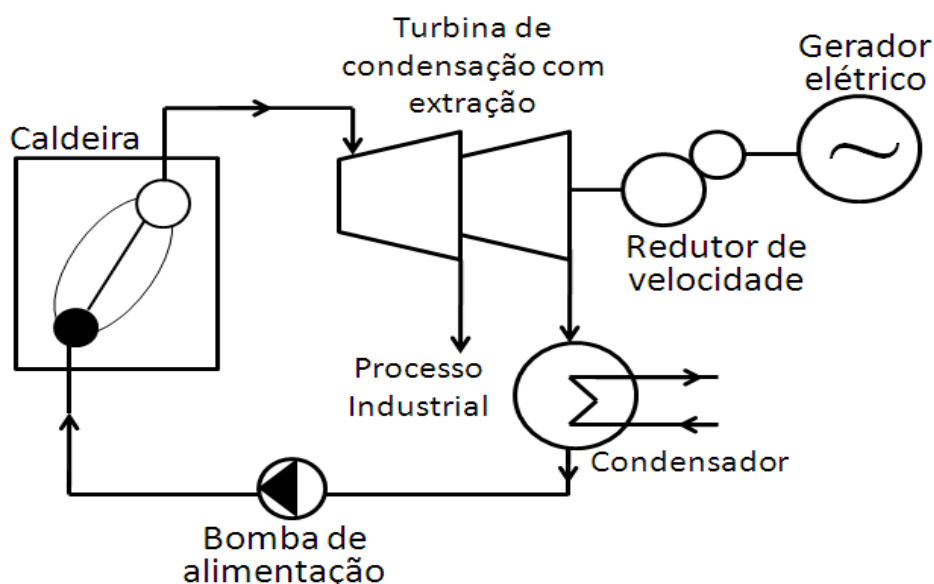


Figura 2.17: Esquemático simplificado turbina de condensação com extração

Fonte: SANTOS, 2012.

As turbinas de condensação com extração são consideradas como sendo turbinas mistas, ou seja, são turbinas de condensação integrada a uma de contrapressão, em um único equipamento. Com isto reduzem-se os investimentos em múltiplas máquinas. Através de válvulas de controle e admissão de vapor, estas turbinas regulam as necessidades de vapor para o processo e para a geração de eletricidade, o que para a maior parte das usinas, possui variações de carga térmica e elétrica.

Durante a safra as variações de cargas são provocadas principalmente pela quantidade de cana que entra na usina, seleção da produção para açúcar ou etanol e eventuais paradas. Durante a entressafra não há requisição de carga térmica da indústria. Ou seja, o sistema atuará exclusivamente para geração de energia elétrica como uma máquina de condensação pura, ou com um consumo mínimo na extração para contribuir com a remoção dos gases não condensáveis da linha de água que retorna para a caldeira (SANTOS, 2012).

2.4.3.3 REDUTOR DE VELOCIDADES

Redutores de Velocidades são conjuntos de engrenagens paralelos, nomeados pares coroa-pinhão. Estes pares são apoiados sobre mancais de deslizamentos refrigerados e lubrificados a óleo e com pontas de eixo flangeadas, para acoplamentos com a máquina motriz, no caso as turbinas e com as máquinas acionadas, que podem ser geradores, moendas, picadores, ventiladores, bombas, entre outros.

Turbinas a vapor normalmente geram rotações diferentes das rotações síncronas dos geradores de eletricidade ou de outros equipamentos que estes acionam. Para tal são utilizados os redutores de velocidade para que seja feito o casamento de velocidades e relação de transmissão de torque.

A rotação do gerador está associada à frequência da rede elétrica e ao número de polos da máquina. A rotação da turbina é determinada por parâmetros que envolvem o projeto construtivo da máquina como diâmetro do rotor, altura das palhetas móveis, potência requerida, resistência mecânica dos componentes e outros fatores. Para a transmissão de torque do eixo da turbina para acionamento do gerador, em situações onde as duas máquinas possuem rotações diferentes, utiliza-se o redutor de velocidades, apresentado na figura 2.18 (SANTOS, 2012).



Figura 2.18: Redutor de Velocidade acoplado ao terno de Moenda em uma Usina

Fonte: ZANINI RENK.

Em indústrias de açúcar e etanol, as turbinas empregadas atingem rotações de até **12.000 RPM**. Os redutores normalmente são especificados pela relação de transmissão, que é a razão entre a rotação de entrada do redutor (rotação da máquina motriz, por exemplo, turbina a vapor) e a rotação de saída da turbina (rotação da carga acionada, por exemplo, gerador síncrono, moenda, etc). Este conceito é resumido na fórmula a seguir:

$$i = \frac{N_1}{N_2} \quad (2)$$

Onde:

i = relação de transmissão;

N1 = rotação de entrada;

N2 = rotação de saída.

Em grande parte das plantas os geradores são máquinas com dois ou quatro pares de polos e operam nas rotações síncronas de **1800 à 3600 RPM**, ou seja, a relação de transmissão para os redutores utilizados varia de **3,33 à 6,67**. Nos casos em que a rotação das máquinas motrizes é a mesma das máquinas acionadas, não existe a necessidade de aplicação dos redutores.

2.4.3.4 GERADORES

Geradores síncronos ou alternadores são máquinas elétricas rotativas, capazes de transformar energia mecânica em energia elétrica. Seu princípio de funcionamento consiste na excitação do fluxo magnético no rotor. São considerados síncronos, devido à correspondência entre as frequências elétrica e a frequência angular, ou seja, o rotor gira na velocidade do campo magnético.

Estes são divididos em duas partes principais: o rotor e o estator. O rotor é o elemento girante, acoplado mecanicamente ao eixo da turbina através do redutor. O estator ou armadura é o componente fixo, montado na carcaça do gerador. No estator é induzida a tensão elétrica por meio de um campo criado no rotor. A figura 2.19 ilustra os principais componentes de um gerador síncrono.

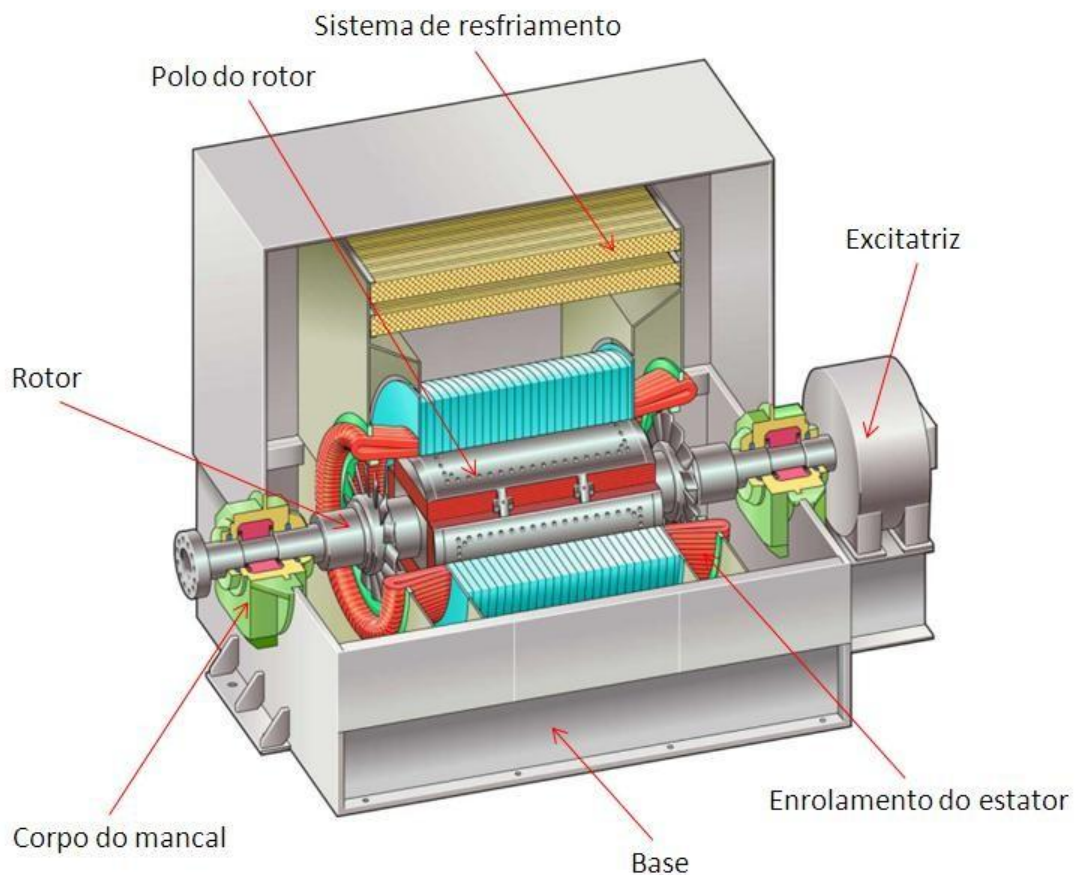


Figura 2.19: Gerador Síncrono e suas principais partes

Fonte: SIEMENS Ltda.

De acordo com SANTOS, 2012, os principais componentes do gerador são:

- **Estator ou armadura** – parte fixa presa à carcaça do gerador e que aloja os enrolamentos que são submetidos à indução e produzem a força eletromotriz. Este é o induzido da máquina;
- **Rotor** – parte girante que aloja as bobinas de campo. Estas bobinas são responsáveis pela indução eletromagnética nas bobinas da armadura. Este é o indutor da máquina;
- **Mancais** – peças que promovem a sustentação do rotor. Estas são continuamente lubrificadas por óleo durante a operação a fim de facilitar o movimento de rotação do eixo e refrigerar o ponto de contato entre os componentes;
- **Excitatriz** – fonte de corrente contínua responsável pela alimentação das bobinas do indutor a fim de controlar o nível de tensão do gerador;
- **Sistema de refrigeração** – podem ser o tipo ar ar ou ar-água. Responsável por manter a temperatura do gerador sob determinados limites operacionais.

Sempre que houver um movimento relativo entre um condutor e um campo magnético constante no entreferro (Br) haverá uma tensão induzida no condutor. No caso da máquina síncrona os condutores são fixados na armadura e o campo magnético é forçado pela máquina primária a se mover. Por sua vez, a máquina primária é acoplada mecanicamente ao rotor onde estão alojados os pólos e exerce sobre eles uma força fazendo- os girar (Lei de **Faraday**¹).

O movimento relativo entre o campo e o condutor faz com que surja uma tensão nos terminais do gerador. Ao ser ligado a uma carga a tensão induzida faz com que circule corrente pelo gerador e pela carga.

A frequência elétrica da tensão induzida está sincronizada com a velocidade mecânica e a velocidade síncrona é a velocidade do campo girante em uma máquina multipolos e pode ser definida pela fórmula abaixo:

$$N_s = \frac{120 * f}{P} (3)$$

Onde:

N_s = rotação Síncrona [RPM];

f = frequência [Hz];

P = par de polos magnéticos;

Em usinas de açúcar e etanol produtoras de eletricidade, são utilizados geradores síncronos, trifásicos e de eixo horizontal de pequeno diâmetro e longo comprimento. Atingem normalmente potências de 50 MW e são constituídos de quatro pares de polos, com rotações síncronas de 1800 RPM.

Geram energia elétrica para a alimentação da própria planta e conseguem exportar o excedente de energia para o SIN. Possuem sistemas de proteção e controle para assegurar todos os requisitos de sincronismo com a rede elétrica e paralelismo com os demais geradores de emergência dos sistemas.

¹**Lei de Faraday ou Lei da Indução:** relaciona a força eletromotriz gerada entre os terminais de um condutor sujeito à variação de fluxo magnético com o módulo da variação do fluxo em função de um intervalo de tempo em que esta variação acontece.

CAPÍTULO 03

3. BIOELETRICIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

A necessidade de diversificação da matriz elétrica brasileira, constituída em mais de 60% por hidrelétricas, alinhada com a necessidade de potencialização de fontes renováveis de energia, sem impactos ambientais, incentivou o crescimento de determinadas fontes renováveis no país. Dentre as variadas fontes renováveis, destaca-se a Bioeletricidade proveniente da Biomassa por bagaço de cana-de-açúcar e palha, pelos motivos apresentados a seguir:

- Custos Competitivos;
- Complementaridade sazonal com relação ao regime de chuvas;
- Alto grau de maturidade da indústria de açúcar e etanol no Brasil;
- Aspectos ambientais e redução de emissões de gás carbono;
- Geração Distribuída, próximo aos centros de consumo.

A bioeletricidade tornou-se o terceiro produto do setor sucroenergético, juntando-se ao açúcar e ao etanol, capaz de impulsionar uma nova revolução de desenvolvimento tecnológico, agregando renda, melhorando a competitividade do açúcar e do etanol e, conseqüentemente, promovendo a expansão do mercado. É de extrema importância frisar que todas as usinas e destilarias são autossuficientes na produção de energia elétrica, por meio de cogeração.

De acordo com o ONS (Operador Nacional do Sistema) a bioeletricidade do setor sucroenergético, por ter a geração concentrada na estação seca, se constitui em fonte de energia de grande relevância para complementar o parque gerador hídrico. Trata-se de uma “energia de inverno”. De acordo com o ONS, para cada 1.000 MWmed de bioeletricidade inseridos no Sistema Interligado durante o período seco significa a poupança de 4% dos reservatórios do subsistema Sudeste e Centro-Oeste. Esta complementaridade é observada no gráfico apresentado na figura 3.1:

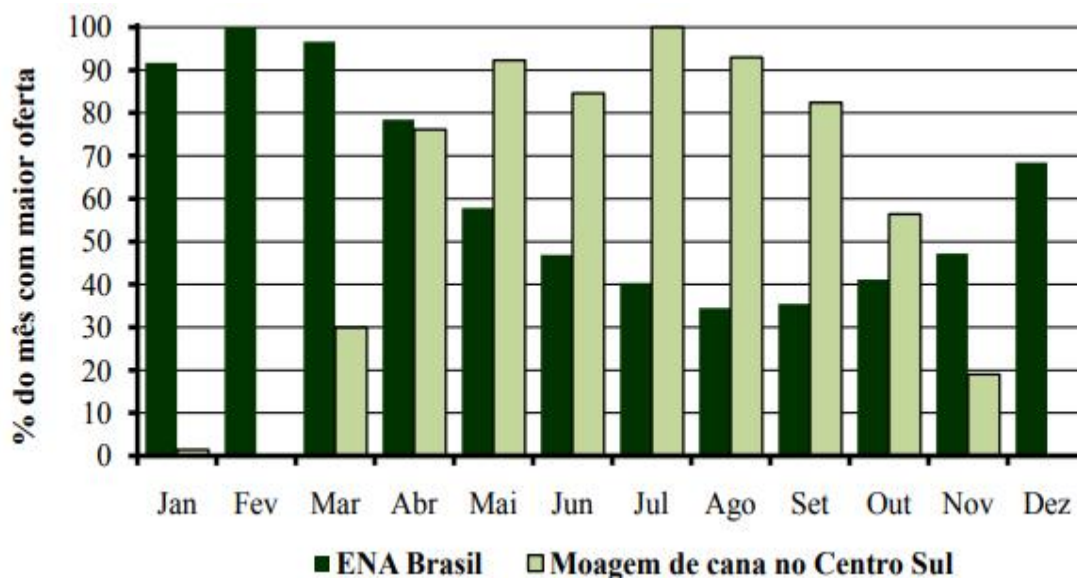


Figura 3.1: Complementaridade da moagem de cana com o regime das chuvas
 ENA Brasil – Energia Natural Afluente nos reservatórios do Brasil.
 Fonte: ONS.

A capacidade de geração de eletricidade das usinas, esta diretamente relacionada com a capacidade de processamento de cana destas, pois quanto maior a quantidade de cana processada, maior a quantidade de bagaço e palha são produzidos. Sendo assim, as usinas são classificadas conforme a tabela a seguir:

Tabela 3.1 - Classificação das usinas quanto ao porte

Classificação	Cana-de-açúcar Processada (toneladas)
Muito Grande	Moagem acima de 5 milhões de toneladas
Grande	Moagem entre 4 e 5 milhões de toneladas
Média Alta	Moagem entre 3 e 4 milhões de toneladas
Média	Moagem entre 2 e 3 milhões de toneladas
Pequena	Moagem entre 1 e 2 milhões de toneladas
Muito Pequena	Moagem abaixo de 1 milhão de toneladas

Fonte: Companhia Nacional de Abastecimento, 2011.

O Brasil conta atualmente com **378** usinas em operação no Brasil, todas elas autossuficientes em energia graças à autoprodução, porém, somente **53%** das usinas, comercializam os seus excedentes de energia elétrica para o SIN. O estado de São Paulo desempenha um papel fundamental nestes números, pois conta com

155 das **378** usinas em operação. O mapa na figura 3.2 apresenta a distribuição da geração por biomassa no Brasil.



Figura 3.2: Geração de eletricidade com Biomassa da Cana no Brasil

Fonte: EPE, CCEE e MAPA

Pode-se observar na figura 21, que a maior parte das usinas está concentrada no estado de São Paulo, seguido por Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, Paraná e posteriormente a região nordeste. Dentre as 203 usinas exportadoras de energia elétrica no Brasil, 102 estão localizadas em São Paulo, representando mais da metade dos 28 TWh totais disponibilizados para o SIN, exportando 15 TWh (CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2017). Todas as usinas em operação no Brasil, processaram durante a safra de 2015/2016 cerca 671 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em um total de 10,87 bilhões de hectares área plantada.

Segundo dados da EPE, a projeção da autoprodução de energia elétrica, onde se enquadram as usinas de açúcar e etanol, para o horizonte de dez anos, mostra uma expansão de 6,2% ao ano, atingindo 98 TWh em 2024, conforme apresentado no gráfico apresentado na figura 3.3. Apesar de mais branda que no PDE anterior, tal projeção ainda se mantém mais vigorosa que a expansão do consumo de eletricidade na rede.

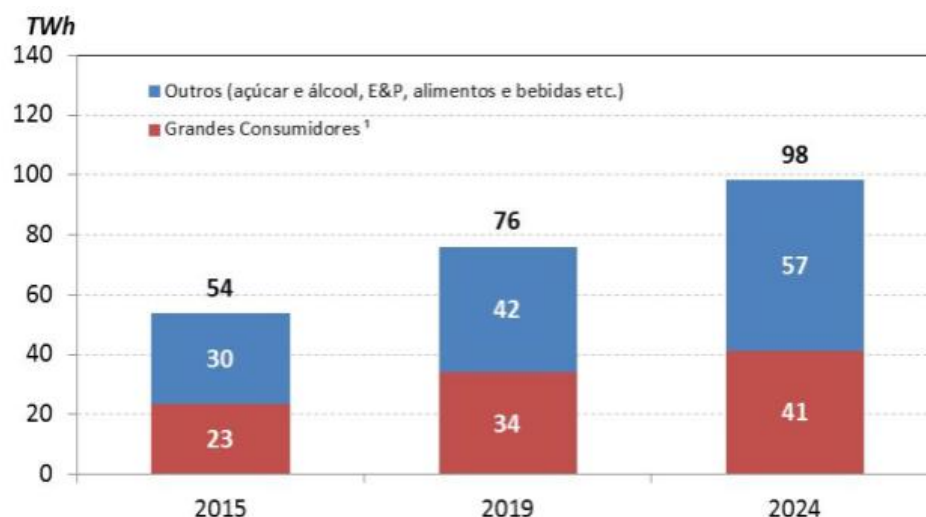


Figura 3.3: Projeção da autoprodução de eletricidade

Fonte: EPE – PDE

3.1 CAPACIDADE DE GERAÇÃO

Atualmente, a fonte biomassa representa 9% da potência outorgada pela ANEEL na matriz elétrica do Brasil. Quando se estratifica a fonte fóssil, a bioeletricidade assume a segunda posição na matriz elétrica brasileira, pois a mais importante contribuição da fonte fóssil é o gás natural, que detém 13.717 MW, inferior à capacidade instalada pela fonte biomassa, conforme tabela na sequência.

Tabela 3.2 - Potência Outorgada no Brasil.

Fontes utilizadas no Brasil - Fase: Operação		
Origem	Potência Outorgada (MW)	%
Fóssil	28.282	17,45
Biomassa	14.512	9,03
Nuclear	1.990	1,24
Hídrica	106.667	66,08
Eólica	10.479	6,19
Solar	28	0,02
Total	161.957	100

Fonte: UNICA.

Quando ampliamos os dados da tabela 3.2, no que tange à bioeletricidade da cana, o setor sucroenergético detém hoje em torno de 7% da potência outorgada no Brasil e 77% da fonte biomassa, sendo a terceira fonte de geração mais importante da nossa matriz elétrica em termos de capacidade instalada, atrás

somente da fonte hídrica e das termelétricas com gás natural. Verifica-se a ampla participação da Biomassa da cana-de-açúcar dentre as demais fontes de Biomassa no geral, conforme tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Potência Outorgada por fontes de Biomassa

Fontes de biomassa utilizadas no Brasil - Fase: Operação		
Origem	Potência Outorgada (MW)	%
Biomassa da Cana de Açúcar	11.205	77,21
Casca de Arroz	45	0,31
Biogás-AGR	2	0,01
Capim Elefante	66	0,45
Floresta	3.063	21,10
Resíduos sólidos urbanos	125	0,86
Resíduos animais	2	0,01
Biocombustíveis líquidos	5	0,03
Total	14.512	100

Fonte: UNICA.

3.2 SELO ENERGIA VERDE

O aumento contínuo da capacidade de geração de bioeletricidade no Brasil, levou a criação do Selo Energia Verde, que é uma certificação emitida pelo Programa de Certificação de Bioeletricidade, uma iniciativa da ÚNICA (União da Indústria de Cana-De-Açúcar) em cooperação com a CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) e apoio da ABRACEL (Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia).

Segundo a ÚNICA, o Selo Energia Verde é a primeira certificação no Brasil focada estritamente na energia produzida a partir do bagaço e palha da cana, contemplando empresas sucro energéticas que exportam eletricidade para o SIN e também as que produzem apenas para o autoconsumo, desde que cumpram as diretrizes do Programa. Ao longo de 2017, as 51 unidades detentoras desta certificação estimam que produzirão para a rede aproximadamente 8 TWh, equivalente a 50% da geração de energia elétrica pelas usinas a carvão no Brasil ou quase 8% do que foi produzido pela usina de Itaipu em 2016. A tabela a seguir

apresenta a lista das unidades produtoras participantes do Programa de Certificação da Bioeletricidade.

Tabela 3.4 - Unidades produtoras de bioeletricidade com Selo Energia Verde

Unidades produtoras de bioeletricidade com Selo Energia Verde			
1	CLEALCO QUEIROZ	30	BIOENERGIA JATAÍ LTDA.
2	CERPA – CENTRAL ENERGÉTICA RIO PARDO S.A.	31	BIOENERGIA MARACÁ LTDA.
3	BCE – BURITIZAL CENTRAL ENERGÉTICA S.A.	32	BIOENERGIA RAFARD LTDA.
4	CENI – CENTRAL ENERGÉTICA NOVA INDEPENDÊNCIA S.A.	33	BIOENERGIA TARUMÃ LTDA.
5	NARDINI AGROINDUSTRIAL S.A.	34	BIOENERGIA UNIVALEM LTDA.
6	UTE RIO VERMELHO 1	35	BIOSEV - UNIDADE LAGOA DA PRATA
7	UTE RIO VERMELHO 2	36	BIOSEV - UNIDADE PASSA TEMPO
8	PARANAPANEMA UMOE	37	BIOSEV - UNIDADE RIO BRILHANTE
9	COFCO BRASIL S.A. – UTE CATANDUVA	38	BIOSEV - UNIDADE SANTA ELISA
10	COFCO BRASIL S.A. – UTE MERIDIANO	39	SANTA CRUZ AB
11	COFCO BRASIL S.A. – UTE NOBLE ENERGIA	40	USINA IRACEMA
12	COFCO BRASIL S.A. – UTE NOBLE ENERGIA II	41	SÃO MARTINHO ENERGIA
13	COFCO BRASIL S.A. – UTE NOROESTE PAULISTA	42	SÃO MARTINHO
14	COFCO BRASIL S.A. – UTE POTIRENDA BA	43	USINA BOA VISTA
15	USINA MONTE ALEGRE	44	PITANGUEIRAS AÇÚCAR E ÁLCOOL LTDA.
16	UTE AMANDINA	45	USINA SANTO ANTONIO S/A.
17	UTE ANGÉLICA	46	USINA SÃO FRANCISCO S/A.
18	VIRALCOOL AÇÚCAR E ÁLCOOL LTDA.	47	USINA UBERABA S/A.
19	VIRALCOOL - CPFL COMERCIALIZAÇÃO BRASIL S.A.	48	UTE VERTENTE
20	VIRALCOOL II - CPFL COMERCIALIZAÇÃO BRASIL S.A.	49	UTE GUARANI CRUZ ALTA
21	AÇUCAREIRA QUATÁ S.A.	50	UTE MANDU
22	AÇUCAREIRA ZILLO LORENZETTI S.A.	51	UTE SÃO JOSÉ COLINA
23	USINA BARRA GRANDE DE LENÇÓIS S.A.	52	UTE COLOMBO ARIRANHA
24	BIOENERGIA BARRA LTDA.	53	UTE COLOMBO ARIRANHA II
25	BIOENERGIA BARRA LTDA. – FILIAL BONFIM	54	UTE COLOMBO PALESTINA
26	BIOENERGIA CAARAPÓ LTDA.	55	UTE COLOMBO SANTA ALBERTINA
27	BIOENERGIA COSTA PINTO LTDA.		
28	BIOENERGIA GASA LTDA.		
29	BIOENERGIA BARRA LTDA. – FILIAL IPAUSSU		

Fonte: UNICA.

3.3 EXPORTAÇÃO PARA O SIN E CONSUMO

Entre 2016 e 2017, o total de bioeletricidade advinda de todas as fontes de Biomassa, foi de 23.865 GWh. Deste total, a bioeletricidade advinda de biomassa da cana-de-açúcar, correspondeu a 89%, conforme tabela a seguir:

Tabela 3.5 - Bioeletricidade gerada para o SIN 2016 e 2017

Bioeletricidade gerada para o SIN em 2016 e 2017				
Tipo de combustível	2016		Jan-abr/2017	
	GWh	%	GWh	%
Biomassa da Cana de Açúcar	21.236	89%	2.538	68%
Biogás - Resíduos sólidos urbanos	370	2%	217	6%
Licor Negro	1.635	7%	539	15%
Resíduos Florestais	317	1%	73	2%
Outros	307	1%	341	9%
Total	23.865	100%	3.708	100%

Fonte: UNICA.

Até 2014, o setor sucroenergético apresentou um crescimento anual significativo na oferta de eletricidade para o Sistema Interligado. Entre 2013 e 2014, o crescimento na oferta de excedentes para a rede foi de 21%, mas foi de 5% em 2015 e 4% em 2016, com relação ao ano anterior, conforme gráfico apresentado na figura abaixo:

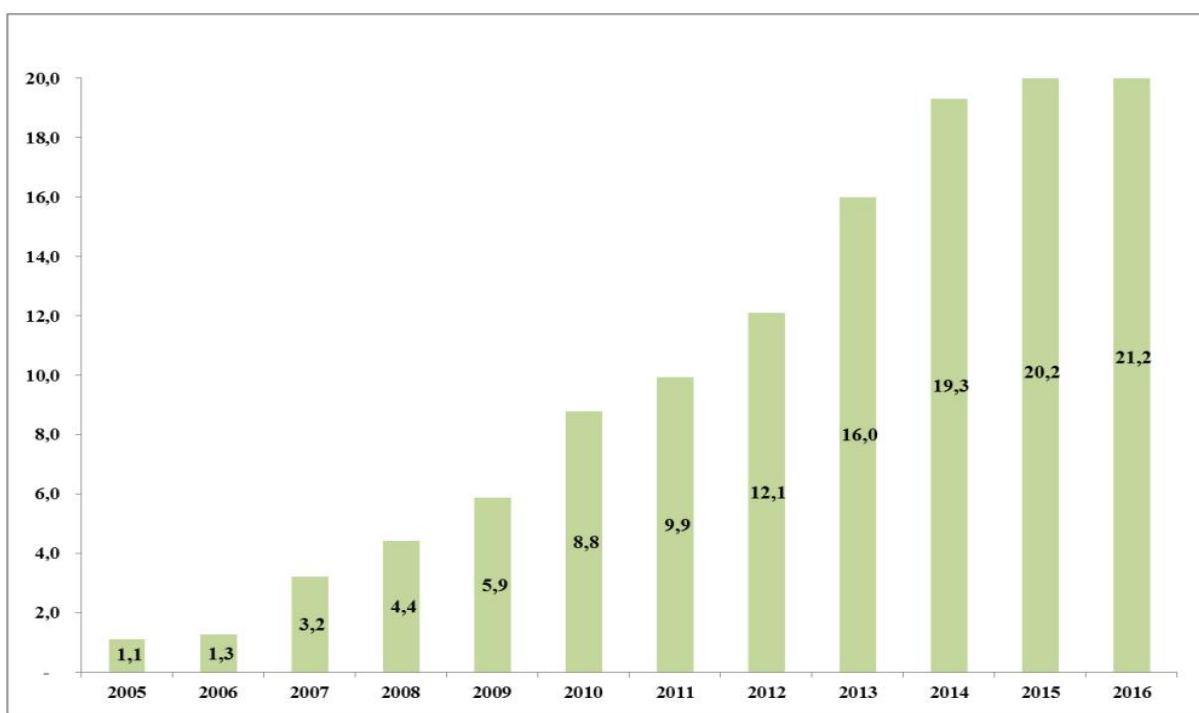


Figura 3.4: Evolução da Bioeletricidade exportada para o SIN

Fonte: ÚNICA

A oferta à rede pelo setor sucroenergético de 21,2 TWh em 2016 representou poupar 15% da água nos reservatórios do submercado elétrico Sudeste/Centro-Oeste, justamente porque essa geração ocorre na época crítica do setor elétrico (período seco).

Essa energia renovável ofertada à rede foi equivalente a ter provido o atendimento a 11 milhões de residências ao longo de 2016 e evitado a emissão de 9,3 milhões tCO₂, marca que somente seria atingida com o cultivo de 65 milhões de árvores nativas por 20 anos. Entre 2010 e 2015, em termos de indicador de kWh exportado para a rede elétrica por tonelada de cana processada, a bioeletricidade teve um incremento superior a 100%, conforme se observa na tabela abaixo.

Tabela 3.6 - Produção e Consumo de Eletricidade nas usinas

Geração de bioeletricidade sucroenergética, 2010-2016, Brasil							
Bioeletricidade sucroenergética	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Autoconsumo (em TWh)	13,6	12,3	13,0	13,9	13,3	13,7	15,0
Ofertado para a rede (em TWh)	8,8	9,9	12,1	16,0	19,3	20,2	21,2
Total (em TWh)	22,4	22,2	25,1	29,9	32,6	33,9	36,2
Indicador kWh por tonelada de cana	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Autoconsumo	21,90	22,02	22,04	21,34	20,98	20,55	
Ofertado para a rede	14,15	17,75	20,56	24,57	30,45	30,29	
Total	36,05	39,77	42,59	45,91	51,43	50,84	

Fonte: UNICA.

3.4 COMERCIALIZAÇÃO

Existem dois ambientes no setor elétrico brasileiro para a comercialização de energia elétrica, em formatos de compra e venda: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), do qual participam agentes de geração e de distribuição de energia (em atendimento aos chamados consumidores cativos); e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), do qual participam agentes de geração, comercializadores, importadores e exportadores de energia e consumidores livres e especiais de energia elétrica.

De acordo com a EPE (2017), do total de número de usinas sucroenergéticas que exportaram energia para o SIN, em 2016, parte atuava exclusivamente no ACL correspondendo a 57% ou no ACR equivalente a 8% e o restante equivalente a 35%, vendia em ambos ambientes de contratação. de 2004 a 2016, o setor canavieiro comercializou um total de 125 projetos nos leilões regulados somando 1.662 MW médios (ou 14.559 GWh para entrega anual), conforme dados apresentados na tabela a seguir.

Tabela 3.7 - Bioeletricidade comercializada em leilões regulados

Bioeletricidade sucroenergética comercializada em leilões regulados		
Ano de venda no leilão	MW médios	Projetos
2004	135	19
2005	64	5
2006	119	9
2007	115	11
2008	541	31
2009	10	1
2010	191	12
2011	102	12
2012	-	-
2013	203	11
2014	90	6
2015	52	3
2016	40	5
Total	1.662	125

Fonte: UNICA.

3.5 POTENCIAL DE GERAÇÃO

De acordo com a EPE (2017), do total de usinas de cana-de-açúcar em operação no Brasil, apenas 44% comercializaram eletricidade, representando um leve aumento em 2016, que eram cerca de 40%. Sendo assim, há mais de 200 usinas, que, com uma biomassa já existente nos canaviais, podem se tornar grandes geradoras de bioeletricidade para a rede.

Segundo o PDE 2024, considerando o aproveitamento pleno da biomassa existente bagaço e palha nos canaviais em 2015, a geração de bioeletricidade sucroenergética para a rede tem potencial técnico para chegar a mais de seis vezes o volume de oferta à rede em 2015, conforme se observa no gráfico apresentado da figura abaixo.

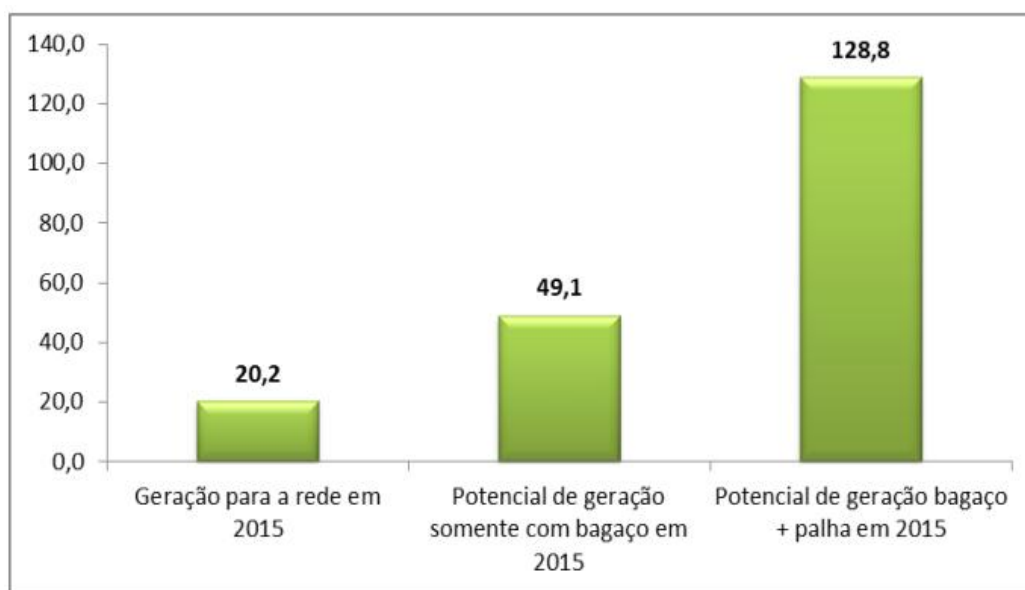


Figura 3.5: Potencial de geração de Bioeletricidade (TWh)

Fonte: ÚNICA

Ainda segundo a EPE, em 2016, a geração de energia para a rede pela biomassa da cana respondeu por 4,6% do consumo nacional de energia elétrica no Brasil e representou aproveitarmos menos de 20% do potencial técnico da bioeletricidade sucroenergética daquele ano. Se aproveitarmos plenamente o potencial técnico da bioeletricidade da cana, somente esta fonte tem capacidade de representar 24% do consumo nacional na rede até 2024.

3.6 ASPECTOS SOCIO AMBIENTAIS

A bioeletricidade da cana-de-açúcar se mostra bastante favorável ao meio ambiente, quando comparada com as demais fontes de geração de eletricidade, principalmente as derivadas de combustíveis fósseis, pois a queima de bagaço de cana libera pouquíssimos compostos a base de enxofre.

Este tipo de geração de eletricidade também apresenta uma grande vantagem, em relação à emissão de CO₂, um dos principais gases causadores do fenômeno Efeito Estufa, porque grande parte do volume de CO₂ emitido na natureza pelos processos de combustão inerentes a geração é absorvida pela própria plantação no canavial, durante o processo de fotossíntese².

Segundo SANTOS (2012), no que tange a sustentabilidade, a biomassa da cana apresenta-se altamente competitiva já que se trata de uma fonte renovável e sua utilização promove a preservação dos recursos findáveis, como os combustíveis derivados de petróleo, gás natural e carvão mineral, por exemplo. Com relação ao uso de água, as grandes plantações das usinas de cana-de-açúcar no Brasil praticamente não são irrigadas. Nas principais regiões produtoras, as necessidades hídricas da plantação são supridas naturalmente pelas chuvas das regiões produtoras e complementadas pela aplicação da vinhaça, subproduto da fabricação de etanol.

Os impactos ambientais advindos de sua implantação também são bem reduzidos, pois este tipo de geração se enquadra em geração distribuída, ou seja, são centrais de geração implantadas próximo aos grandes centros de consumo de eletricidade, como por exemplo, a região sudeste do Brasil, evitando-se assim grandes impactos na fauna e flora, com a implantação de linhas de transmissão, subestações, fundações, entre outros

² **Fotossíntese** é um processo físico-químico, a nível celular, realizado pelos seres vivos clorofilados, que utilizam dióxido de carbono e água, para obter glicose através da energia da luz solar.

CAPÍTULO 04

4. ELETRIFICAÇÃO DOS ACIONAMENTOS: ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ESTUDO DE APLICAÇÃO

Tipicamente os sistemas de preparo e extração de caldo da cana-de-açúcar, constituídos por Picadores, Desfibradores e Moendas. Estes equipamentos detêm a maior potência instalada dentro de uma usina de açúcar e etanol, representado mais de 50% da potência mecânica como ilustrado no gráfico apresentado na figura a seguir:

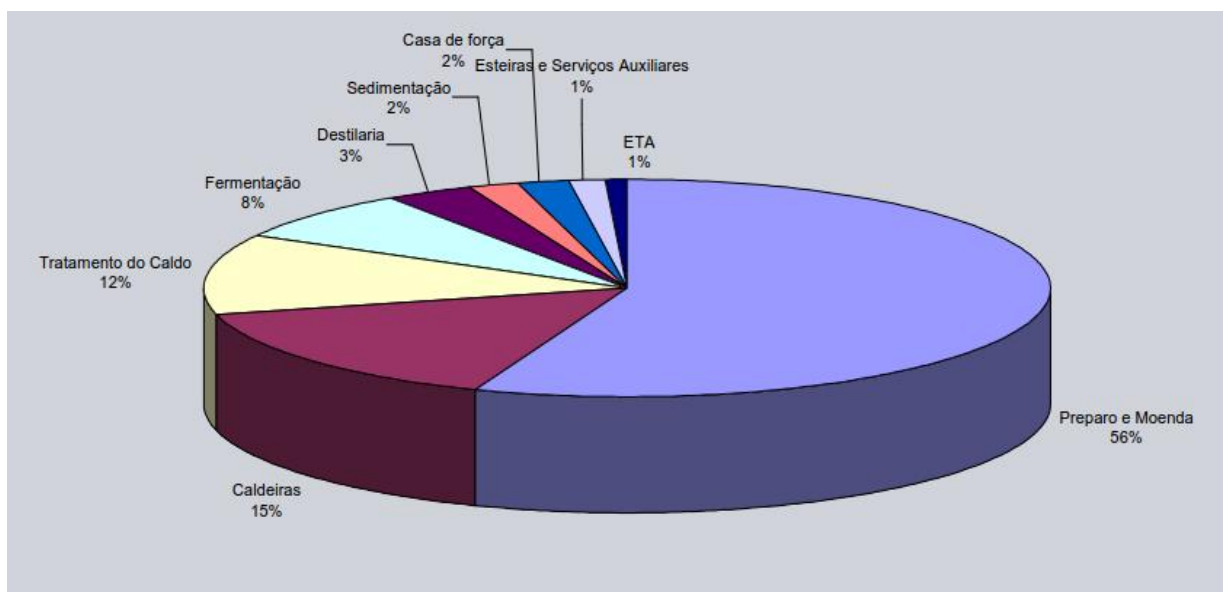


Figura 4.1: Potência Instalada em uma Usina

Fonte: SIEMENS Ltda

Estes sistemas são comumente acionados por conjuntos de turbinas a vapor mais redutores de velocidade, como explanados nos capítulos anteriores deste trabalho. Sendo assim, o consumo de vapor nas usinas é dividido em três áreas:

- **Vapor de Processo:** utilizado nos processos de produção de açúcar e etanol;
- **Vapor para acionamentos:** utilizado para acionar os sistemas de preparo e extração de caldo de cana;
- **Vapor para geração de eletricidade:** utilizado para acionamento dos turbogeradores, responsáveis pela geração de eletricidade, para o consumo interno na planta e exportação para o SIN.

Com o aumento da autoprodução de eletricidade e exportação do excedente de energia para o SIN surge a eletrificação dos acionamentos, visando o aumento de

eficiência energética no projeto de cogeração nas plantas de açúcar e etanol. A eletrificação consiste fundamentalmente na substituição das turbinas a vapor, antes responsáveis pelo acionamento dos picadores, desfibradores e moendas, por motores elétricos de alto rendimento mais conversores de frequência, para controle e variação de velocidade destes equipamentos.

O objetivo principal da eletrificação é maximizar a disponibilidade de vapor (consumido pelas turbinas de acionamento) para geração de eletricidade. Além da redução no consumo de vapor e maior eficiência em comparação com as turbinas de acionamento, os motores elétricos com velocidade variável, empregados nas usinas apresentam outras vantagens como maior eficiência na extração do caldo nas moendas, maior controle do processo pela flexibilidade no controle de velocidade da moenda através de inversores de frequência, que eliminam os impactos causados por oscilação de pressão de vapor. A utilização de motores elétricos resulta em uma instalação compacta e reduzida e maior facilidade para manutenção. Em questões de eficiência de máquina de acionamento, os motores elétricos superam muito as turbinas a vapor para esta aplicação. Enquanto as turbinas a vapor de simples estágios apresentam eficiência próxima de **60%**, **os sistemas eletrificados atingem valores de até 95%** (SANTOS, 2012).

Além do aumento da disponibilidade de vapor para geração de eletricidade e maior eficiência na planta, a eletrificação de moendas traz outras vantagens intrínsecas à tecnologia, como as apresentadas a seguir:

- **Maior produtividade**, extraindo maior quantidade de caldo utilizando o mesmo terno.
- **Maior controle do processo**, pela flexibilidade no controle de velocidade da moenda.
- **Operação remota**, reduzindo riscos com acidentes em campo, pois todos os equipamentos eletrificados podem ser controlados remotamente, pela sala de controle da planta.

A eletrificação da moenda pode ser total, com a substituição de todas as turbinas a vapor por acionamentos elétricos, ou parcial com a substituição do acionamento mecânico de um dos rolos do terno de moenda, por acionamento elétrico, mantendo a turbina a vapor nos demais rolos. Nestes casos, apesar da eliminação de vapor não ser total, o aumento da produtividade e disponibilidade do

terno é garantido. Sendo parte vital do processo de produção de açúcar e álcool, a moagem exige total disponibilidade durante a safra, com o mínimo de paradas. Os sistemas de eletrificação de moendas garantem a maior disponibilidade graças menores esforços mecânicos e menor tempo de parada para intervenções em maquinário.

4.1 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE ACIONAMENTOS

Existem basicamente três sistemas de acionamento utilizados em usinas de açúcar e etanol: Sistemas Mecânicos, Sistemas Elétricos e Sistemas Hidráulicos. No Brasil, a maior parte das plantas ainda utiliza sistemas mecânicos ou hidráulicos, sendo que os sistemas elétricos passaram a ser aplicados nas usinas mais modernas, já projetadas com o intuito de apresentarem maior capacidade de geração de eletricidade e maior eficiência nos processos produtivos.

A figura a seguir apresenta os diferentes níveis de eficiência entre os sistemas de acionamento aplicados:

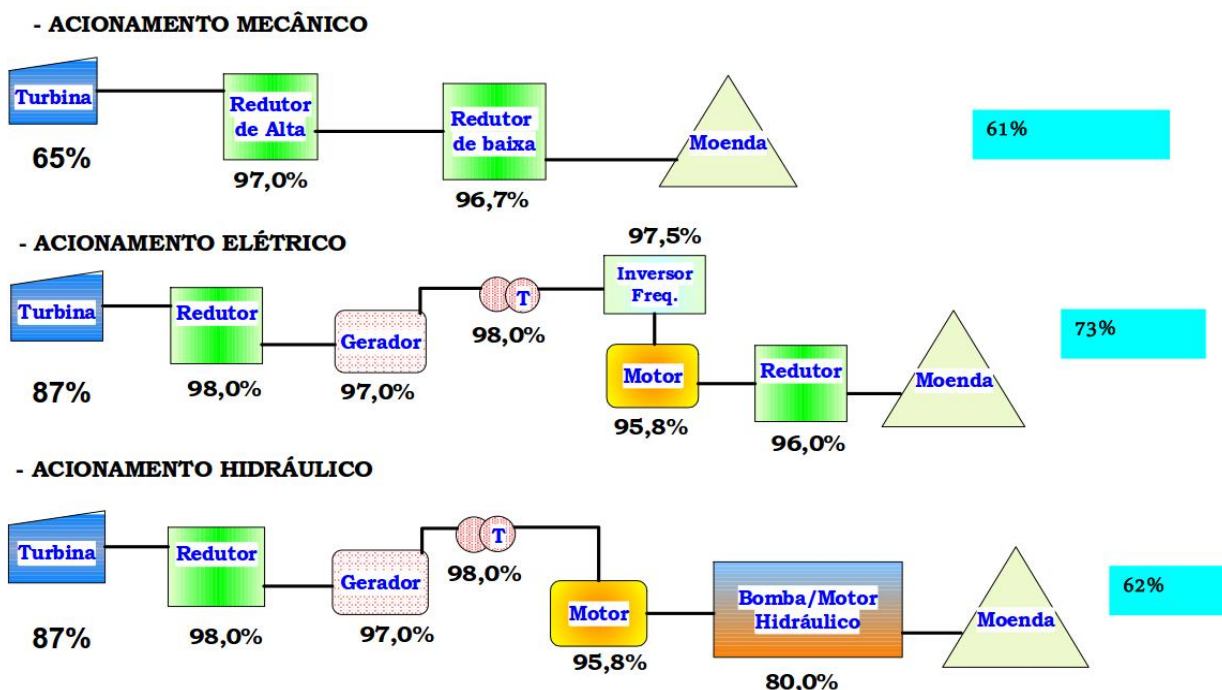


Figura 4.2: Comparativo de Eficiência entre Sistemas de Acionamento.

Fonte: Workshop Usina do Futuro, Ribeirão Preto-SP, 2012.

Nota: Rendimentos considerados para operação em condições nominais

Observa-se na figura comparativa acima, que os níveis de eficiência dos sistemas de acionamento elétrico são superiores aos mecânicos e hidráulicos, isto devido aos equipamentos que o constituem, basicamente compostos por motores elétricos de alto rendimento (acima de 95%), Conversores de Frequência estáticos (com rendimentos de acima de 96%) e demais componentes a montante da instalação, como transformadores e dispositivos de proteção de entrada.

Os níveis altos de eficiência dos acionamentos elétricos refletem diretamente nos ganhos energéticos da planta, onde se destaca o aumento da disponibilidade de vapor para geração de eletricidade, que como o terceiro produto nas usinas, aumenta a competitividade do açúcar e etanol produzido, maximizando os níveis de lucratividade do sector. O gráfico ilustrado na figura a seguir, apresenta um comparativo da energia exportada por usinas, utilizando diferentes sistemas de acionamento:

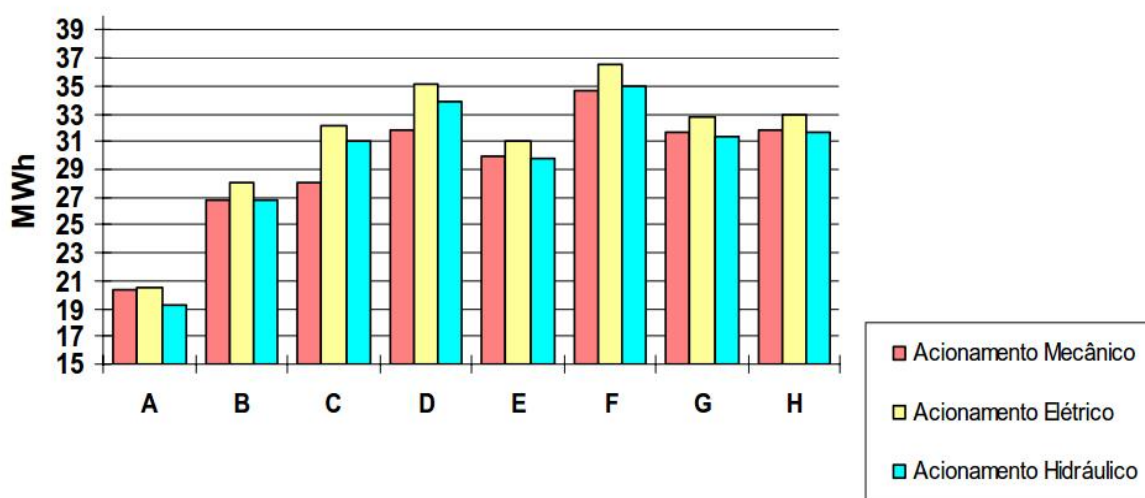


Figura 4.3: Excedente de energia, por diferentes sistemas de acionamento.

Fonte: Workshop Usina do Futuro, Ribeirão Preto-SP, 2012.

O gráfico acima teve como base as seguintes premissas:

- Eficiência Média das Caldeiras de 86%;
- A = Sistemas com 22 bar / 300 °C;
- B = Sistemas com 31 bar / 350°C;
- C = Sistemas com 22 bar / 300°C e 43 bar / 400°C;
- D = Sistemas com 22 bar / 300°C e 63 bar / 485°C;
- E = Sistemas com 43 bar / 400°C;
- F = Sistemas com 63 bar / 485°C;
- G = Sistemas com 43 bar / 400°C e 63 bar / 485°C;

- H = Sistemas com 43 bar / 400°C e 83 bar / 510°C.

Os dados apresentados acima são valores típicos de pressão e temperatura nos sistemas de cogeração na maior parte das usinas brasileiras exportadores de eletricidade.

É de extrema importância, avaliar os ganhos energéticos de todo o sistema substituindo os acionamentos mecânicos pelos elétricos levando em consideração que, apesar de haver maior disponibilidade de vapor para geração de energia elétrica, em contrapartida o consumo de eletricidade aumentará em função da instalação dos motores elétricos e demais equipamentos do sistema. No entanto, os cálculos evidenciam que, mesmo com o aumento no consumo de energia elétrica da planta, o potencial de exportação de energia elétrica para a rede, sempre aumenta.

Este aumento da capacidade de geração de eletricidade é observado nos esquemáticos apresentados nas figuras 4.4 e 4.5, onde na primeira (figura 4.4), temos uma usina operando com **ciclo de vapor de alta pressão e condensação**, alimentando as turbinas para os acionamentos (picador / desfibrador e Moendas) e alimentando também os turbogeradores para geração de eletricidade. Neste sistema a capacidade de geração da planta é de **76MW**, dentre os quais, **14MW** são para o consumo interno na planta e **62 MW**, são para a exportação ao SIN.

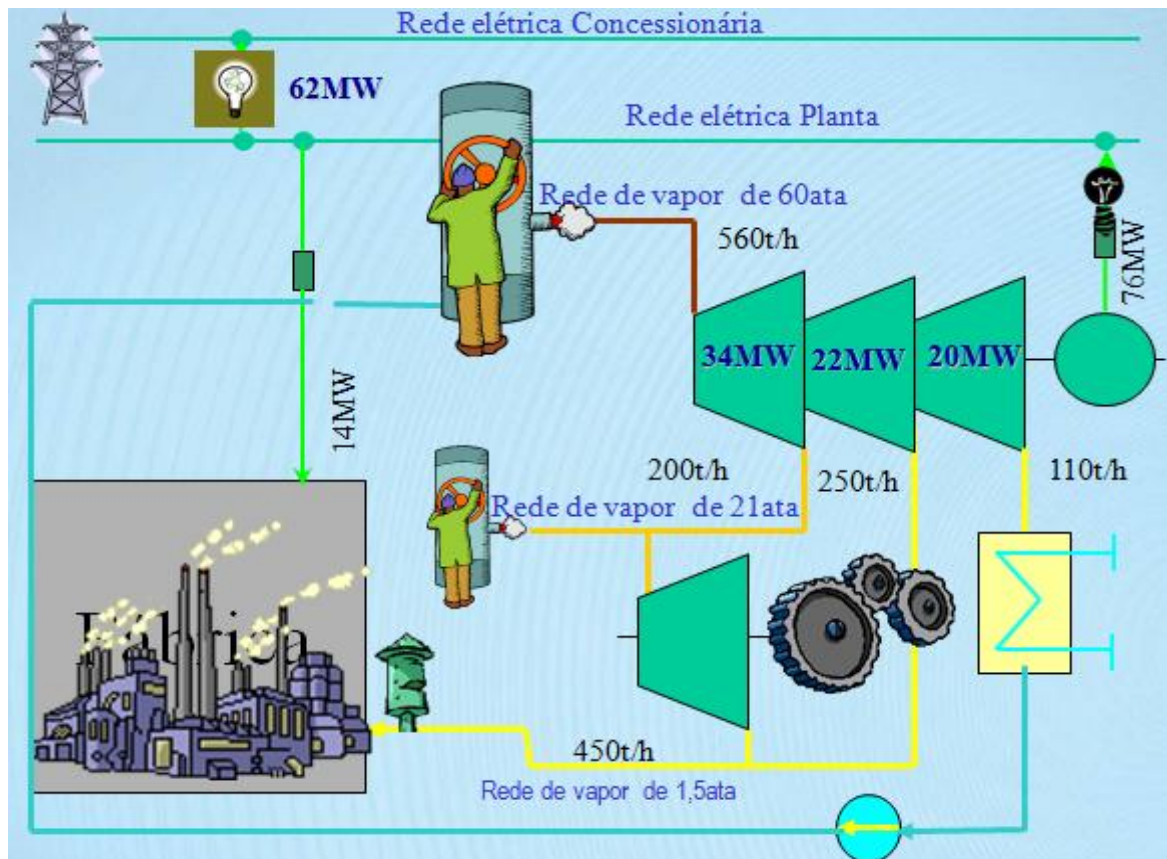


Figura 4.4: Geração em sistema de vapor de alta pressão e condensação com acionamentos mecânicos

Fonte: SIEMENS Ltda.

Observa-se a necessidade de vários estágios de turbinas para acionamento dos equipamentos de preparo e extração da cana-de-açúcar, com isto tem-se no final uma menor disponibilidade de vapor para geração de eletricidade.

Já na figura 4.5, apresenta-se uma usina operando também com **ciclo de vapor de alta pressão e condensação**, porém sem acionamento mecânico dos equipamentos de preparo e extração da cana-de-açúcar. Esta planta já utiliza acionamentos elétricos, com isto tem uma maior disponibilidade de vapor para geração de eletricidade e aumento no consumo de energia da planta. Sendo que, a sua capacidade de geração aumenta para **111 MW**, subdivididos em **14 MW** para consumo interno da planta, **15 MW** para consumo dos equipamentos elétricos do preparo e extração (motores elétricos e conversores de frequência) e 82 MW são destinados à exportação ao SIN.

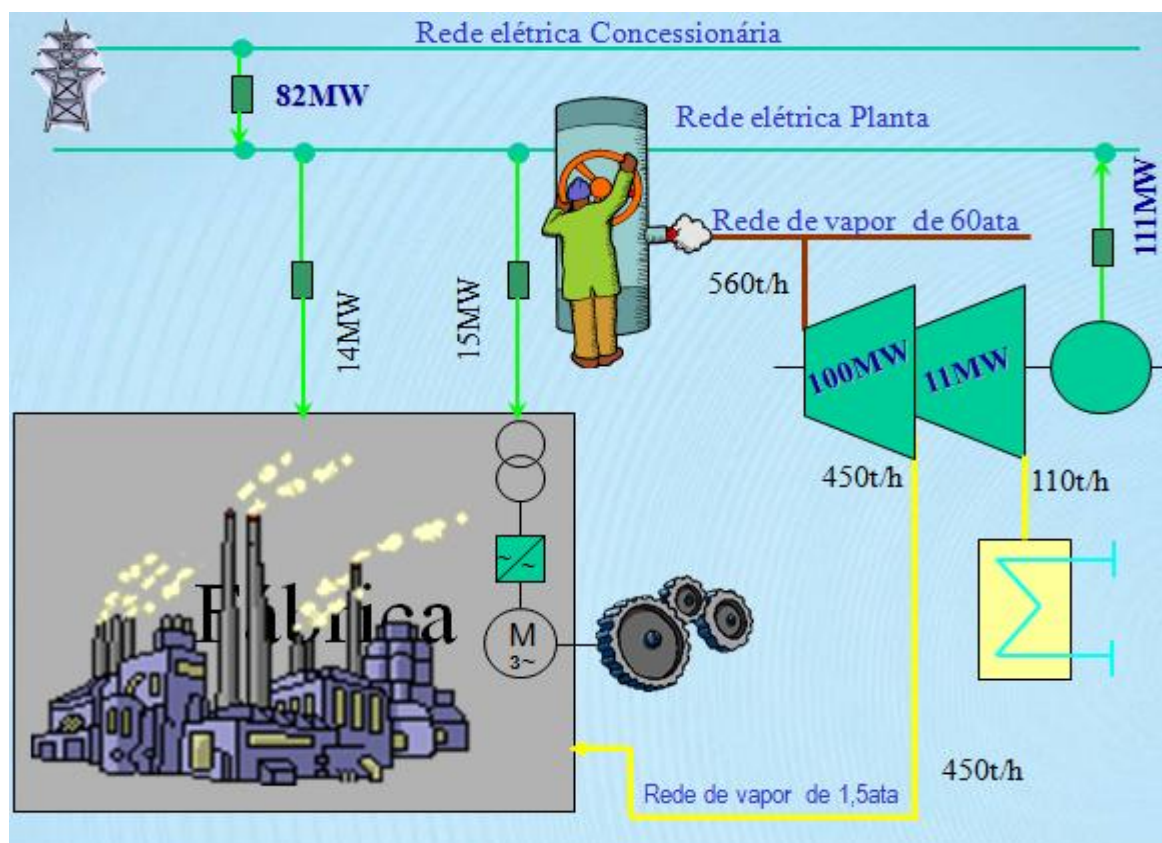


Figura 4.5: Geração em sistema de vapor de alta pressão e condensação com acionamentos elétricos
Fonte: SIEMENS Ltda.

Os níveis de eficiência dos equipamentos apresentados na figura 4.2 são comprovados nas figuras 4.4 e 4.5, onde se observa claramente que apesar do aumento do consumo interno de energia na planta, o aumento da energia exportada é considerável, em torno de 24,4% para este caso em específico. Os demais ganhos intrínsecos a eletrificação serão apresentados com mais detalhes nos próximos pontos deste trabalho, ainda neste capítulo.

A eletrificação consiste na aplicação de motores elétricos e sistemas de partida e controle de velocidade modernos, bem como a aplicação de todos os dispositivos elétricos para proteção e garantia de ótimo funcionamento dos acionamentos como transformadores de potência e cubículos. No tópico a seguir serão abordados com detalhe, onde e como cada um destes equipamentos elétricos, podem ser aplicados em um projeto de eletrificação de Usinas de açúcar e etanol.

4.2 ESTUDO DE APLICAÇÃO

Nas usinas de açúcar e etanol modernas e mais eficientes, os motores elétricos de alto rendimento são responsáveis pela geração de força motriz para acionamento e controle de equipamentos dedicados ao processo de preparo e extração de caldo da cana, como Picadores, Desfibradores e Moendas. São motores elétricos de grande porte, em média ou em baixa tensão e a sua aplicação demanda determinados cuidados e estudos que irão garantir o ótimo e pleno funcionamento destes, para que se almejem os resultados esperados.

Faz-se necessário entender e determinar quais motores aplicar em cada máquina, ou seja, qual o sistema de partida e controle de velocidade aplicável para cada caso, quais alimentadores especificar, níveis de tensão e potência adequados e eliminar os possíveis problemas de aplicação, que poderão impedir o correto funcionamento do sistema como um todo.

4.2.1 MOTORES ELÉTRICOS ASSÍNCRONOS OU DE INDUÇÃO TRÍFÁSICOS

Motores elétricos são equipamentos eletromecânicos que geram força motriz rotacional, através da ação de campos eletromagnéticos, que induzem forças de repulsão e atração produzidas com a passagem de corrente elétrica pelos seus enrolamentos.

Motores de Indução ou assíncronos são motores onde o rotor tem a velocidade diferente da velocidade do campo magnético girante. Ao ser aplicado um **conjugado ou torque (também chamado de torque ou binário, é a medida do esforço necessário para girar o eixo)** externo ao motor, o seu rotor diminuirá a velocidade na justa proporção necessária para que a corrente induzida pela diferença de rotação entre o campo girante (síncrono) e o rotor, passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado externamente aplicado. Por serem robustos e mais baratos, são os motores mais largamente empregados nas indústrias de açúcar e etanol.

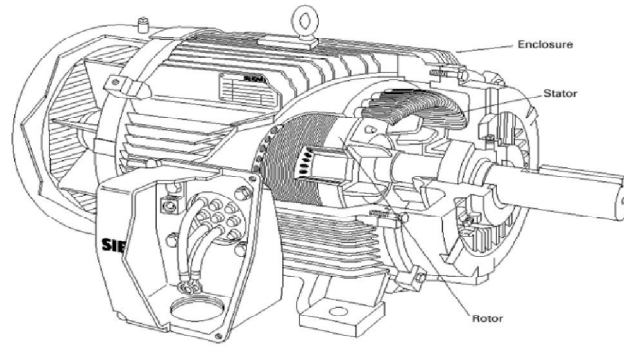


Figura 4.6: Motor elétrico de Indução

Fonte: SIEMENS Ltda.

Estes motores são compostos de três partes principais:

- **Estator:** é composto por milhares de laminas de ferro, que quando montadas juntas formam uma espécie de cilindro. Os fios isolados de cobre são colocados nas ranhuras formando as espiras. A construção e colocação destas espiras dá origem ao campo girante do motor quando ligado diretamente à rede elétrica, assim como o numero de pólos que o motor irá possuir. A figura 4.7 ilustra a construção de um estator com as ranhuras e espiras.

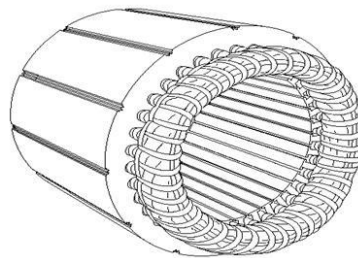


Figura 4.7: Estator de um Motor elétrico de Indução.

Fonte: SIEMENS Ltda.

- **Rotor:** é a parte girante do circuito eletromagnético, o rotor é composto de várias lâminas de ferro unidas, estas lâminas possuem ranhuras onde correm barras de alumínio condutoras, conforme apresentado na figura 4.8.

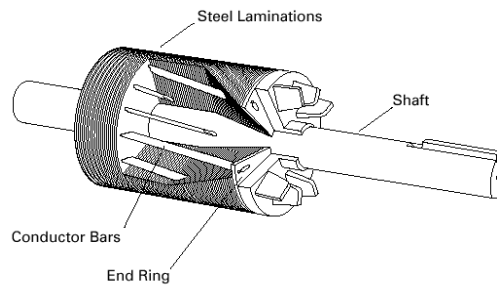


Figura 4.8: Rotor de um Motor elétrico de Indução

Fonte: SIEMENS Ltda.

- **Encapsulamento:** corpo do motor, constituído por carcaça, ventilador, rolamentos, mancais e caixa de ligação.

Os motores elétricos acionam diferentes tipos de cargas, com características de torque ou conjugado (**M**) diferentes. É de extrema importância sabermos o comportamento de torque da carga que o motor a ser especificado irá acionar. Existem **cargas de torque proporcional onde o torque (**M**) é diretamente proporcional à rotação (**n**)**, **cargas de torque quadrático onde o torque é diretamente proporcional ao quadrado da rotação**, **cargas de constante onde o torque é constante em toda faixa de rotação do motor** e finalmente **cargas com comportamento de torque reverso, onde o torque é inversamente proporcional à rotação**. Na figura a seguir é apresentado de forma resumida, o comportamento de cada uma destas curvas:

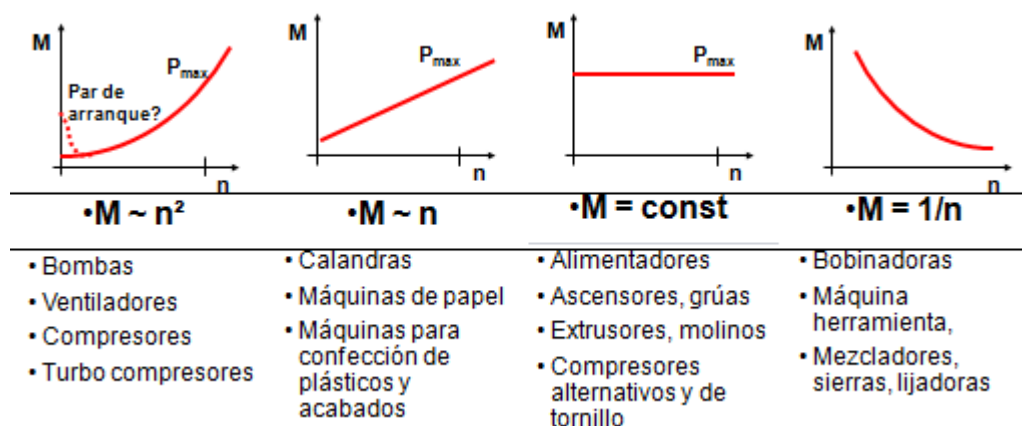


Figura 4.9: Curvas de Torque para diferentes tipos de carga.

Fonte: SIEMENS Ltda.

Os equipamentos utilizados nos sistemas de preparo e extração de caldo de cana nas usinas, possuem todos comportamento de torque constante, ou seja, o torque é constante para toda a faixa de rotação do motor.

De acordo com o PROCEL, a especificação de motores de uma forma geral deverá obedecer aos seguintes parâmetros:

- Rendimento;
- Tensão de Operação;
- Fator de Potência;
- Conjugado ou torque de partida;
- Conjugado ou torque máximo;
- Velocidade de operação;
- Capacidade de aceleração;
- Classe de Isolamento;
- Corrente de partida;
- Inércia da carga e número de partidas;
- Fator de Serviço (regime de sobrecarga continua motor);
- Ruído;
- Temperatura de operação;
- Tipo de Carcaça;

Alguns dados acima são retirados de catálogos fornecidos pelos próprios fabricantes e outros poderão ser calculados pelas fórmulas úteis apresentadas a seguir:

A corrente de um motor assíncrono é
$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times \eta \times \cos \varphi \times V}$$

Torque e potência
$$P = \frac{T \times n}{9,550}$$

Velocidade síncrona
$$n_{assincrona} = \frac{120 \times f}{n_{pólos}} \times (1 - s)$$

I = corrente [A]
 P = potência ativa [W]
 S = potência aparente [VA]
 V = Tensão [V]
 T = Torque [N.m]
 J = momento de inércia [kg.m²]
 T_p = tempo de partida [s]
 n = rotação em RPM
 $\cos \varphi$ = fator de Potência
 s = Escorregamento

Tempo de partida
$$t_p = \frac{J \times \Delta n}{9,55 \times T_a}$$

Fator de Potência
$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$HP = 0,746 kW$
 $CV = 0,736 kW$

Figura 4.10: Fórmulas úteis para cálculo de parâmetros de Motores de Assíncronos.

Fonte: SIEMENS Ltda.

4.2.1.1 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

De acordo com CLETO 2012, um motor de alto rendimento possui rendimento superior ao motor padrão e, conseqüentemente, perdas mais reduzidas. Isto é possível devido a mudanças no projeto de construção, materiais e melhores processos de fabrico. O rendimento é a relação entre a potência mecânica desenvolvida no eixo do motor e a potência elétrica ativa que ele consome da rede de alimentação. A expressão que traduz esta relação é a seguinte:

$$n (\%) = \frac{\text{Potência Mecânica [kW]}}{\text{Potência Consumida [kW]}} * 100 \quad (4)$$

ou

$$n (\%) = \frac{\text{Potência Saída [kW]}}{\text{Potência de entrada [kW]}} * 100 \quad (5)$$

Se considerarmos que a **Potência de entrada = Potência de Saída – Perdas**, logo teremos:

$$n (\%) = \frac{\text{Potência entrada [kW]} - \text{Perdas}}{\text{Potência de entrada [kW]}} * 100 \quad (6)$$

Ainda segundo CLETO 2012, as perdas menores no motor de alto rendimento significam que este motor produz a mesma potência mecânica de saída com menos potência de entrada que um motor padrão. Desta maneira o motor de alto rendimento tem custo de operação menor. As principais vantagens dos motores de alto rendimento, quando comparados com motores clássicos padrão, são as seguintes:

- Reduzem o consumo de energia elétrica
- A maioria destes motores apresenta fator de potência mais elevado;
- Apresentam menores temperaturas de operação, reduzindo as perdas térmicas e prolongando a isolação dos enrolamentos do motor;
- O rendimento é mais elevado para cargas baixas.
- Minimizam o sobredimensionamento nas situações em que não se pode corrigir a potência do motor.

A figura a seguir mostra um gráfico comparativo entre motores de alto rendimento e motores de rendimento padrão:



Figura 4.11: Motores de Alto rendimento x Rendimento Padrão.

Fonte: PROCEL, Guia Técnico Motores de Alto rendimento.

Os motores elétricos de alto rendimento possuem rendimentos nominais mínimos definidos por norma, para cada combinação de potência versus velocidade. Os fabricantes de motores elétricos devem garantir que o rendimento nominal real do motor não deve ser inferior ao rendimento nominal declarado na placa de dados do motor, dentro da faixa permitida por norma NBR 7094. A tabela a seguir apresenta alguns valores de rendimento, conforme faixas de potência e rotação síncrona de motores.

Tabela 4.1 - Rendimentos nominais de motores de acordo com a NBR 7094

POTÊNCIA NOMINAL		VELOCIDADE SÍNCRONA (rpm)			
cv	kW	3.600	1.800	1.200	900
		RENDIMENTO NOMINAL			
1	0,75	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	82,5	81,5	77,0	77,0
2	1,5	83,5	84,0	83,0	82,5
3	2,2	85,0	85,0	83,0	84,0
4	3,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5	3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
6	4,5	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	94,7	95,0	95,0	-
200	150	95,0	95,0	95,0	-
250	185	95,4	95,0	-	-

Fonte: PROCEL, Guia Técnico Motores de Alto rendimento.

4.2.1.2 MOTORES ASSÍNCRONOS EM PICADORES E DESFIBRADORES

Os Picadores e Desfibradores preparam a cana proveniente de colheita não mecanizada (picadores) ou mecanizada (desfibradores) para o processo de moagem, e ficam localizados ao longo da esteira metálica em uma usina e são tradicionalmente são acionados por turbinas a vapor. Para melhorar o desempenho do conjunto com a eliminação de oscilações nas redes de alimentação de vapor e

aumentar a disponibilidade de vapor para geração de eletricidade, o uso de motores elétricos se faz necessário.



Figura 4.12: Picador e Desfibrador acoplados aos respectivos motores Elétricos

Enquadram-se nas cargas com característica de torque constante e os motores para estas aplicações são em sua maioria de potências entre **1.000 CV a 7.000 CV**, **devido à alta Inércia e o Conjugado de Resistente na partida (requerem alto torque de partida)**. Devido as potências elevadas e redução de custos com a aquisição de cabos de conexão, recomenda-se a aplicação de **Motores de média tensão entre 4,16 kV a 13,8 kV**. Nesta faixa de potência, os motores modernos possuem rendimentos iguais ou superiores a **95%**.

Normalmente são aplicados motores de **6 a 8 pólos** para atender as necessidades de torque de partida da máquina, onde motores de 8 pólos dispensam a aplicação de redutores de velocidade, pois já operam próximo da faixa de rotação de operação das máquinas.

Em ambas aplicações não existe a necessidade de variação de velocidade, pelo que se aplicam os sistemas de partida direta, ou as transferências síncronas ou assíncronas.

Os motores assíncronos são amplamente utilizados para acionamento de picadores e desfibradores em relação aos motores de anéis, por não exigirem manutenção elétrica frequente, como: troca de escovas, anéis e limpeza. Sem contar a manutenção e inspeção do nível da solução do reostato líquido, que é o sistema de partida mais utilizado quando se aplicam motores de anéis.

4.2.1.3 MOTORES ASSÍNCRONOS EM MOENDAS

Os ternos de moenda, são responsáveis pela extração do caldo que é a matéria prima para a produção de açúcar e álcool, são em geral conjuntos de quatro e / ou até sete ternos.

Tradicionalmente acionados por vapor, acionamento hidráulico ou ainda por acionamento elétrico, sendo esta última, a solução que melhor apresenta redução de perdas no processo de moagem da cana, sendo a mais aceita nas usinas que têm como objetivo, não só a produção de açúcar e álcool, mas também a produção de energia elétrica para exportação ao SIN.

Assim como picadores e desfibradores, também são cargas com características de torque constante e os motores assíncronos aplicados nos ternos de moenda possuem potências entre **700 CV a 2.500 CV**. Nesta faixa de potências, a recomendação é pelo uso de motores em baixa tensão **690 Vac** ou média tensão entre **2,3 kV a 6,6 kV**, dependendo muito dos níveis de tensão já existentes na planta industrial. Nesta faixa de potência, os motores modernos possuem rendimentos iguais ou superiores a **95%**.



Figura 4.13: Motores Elétricos acoplados aos ternos de Moenda

Para aplicações em ternos de moenda existe também a possibilidade de **repotencialização do terno**, que consiste no aumento de potência do terno, desacoplando um dos seus rolos e este passar a ser acionado por eletricamente e os demais continuam acionados por turbinas a vapor, como ilustrado na figura abaixo:



Figura 4.14: Motor acoplado a um rolo individual do terno de Moenda

A vantagem da repotencialização consiste na eliminação da necessidade de um redimensionamento da linha de vapor para aumento da capacidade de potência da moenda. Os motores para esta aplicação variam entre as potências de 250 CV a 700 CV, dentro destas potências a sugestão é pelo uso em baixa tensão 440, 460 ou ainda 690 Vac.

Assim como destacado no capítulo de revisão bibliográfica deste trabalho, a rotação de saída das moendas varia de 3,5 a 8 RPM e para tal são utilizados motores de 6 pólos com variadores de velocidade e redutores de velocidade, para se duplicar o torque requerido pela carga. A potência mecânica para definição da potência de eixo do motor elétrico é determinada pelo tamanho da moenda em polegadas, que está diretamente relacionado à quantidade de cana moída por hora, a percentagem de fibra da cana e ao torque requerido pela moenda. A tabela a seguir apresenta os tamanhos mais utilizados nas usinas no Brasil.

Tabela 4.2 - Tamanhos e potências de referência em Moendas

MOENDAS REFERÊNCIAS					
Tamanho Polegadas	Capacidade de moagem (TCH)	Fibra da cana (%)	Potência Mecânica Resultante (CV)	Rotação RPM	Torque T2N (Nm)
37" x 66"	500	13	1203	7	1.205.936
42" x 78"	600	13	1443	7	1.447.123
46" x 84"	750	13	1804	7	1.808.904
50" x 90"	1050	13	2525	7	2.532.465

Fonte: Usina Moreno

Quanto maior o tamanho em polegadas, maior será a quantidade de cana moída, bem como seu torque e potência mecânica resultante a ser aplicada nos motores elétricos. Recentemente, com o desenvolvimento da cana energia, tipo de cana-de-açúcar com maior teor de fibras, voltada para uso exclusivo na produção de energia, moendas acima de **50" x 90"** têm sido desenvolvidas pelos fabricantes e estas exigirão motores elétricos de maior potência respectivamente.

Para correta aplicação de motores elétricos em moendas, é necessário fazer a análise das curvas de torque do motor e da carga, ou seja, analisar se o motor elétrico especificado entregará o torque suficiente para a carga em toda sua faixa de operação. Nos parágrafos a seguir serão apresentados os principais passos do processo de verificação das curvas de torque *versus* velocidade de uma moenda / motor elétrico. Para este caso foi tomado como base uma moenda de 46" x 84", com acionamento individual dos seus seis ternos.

Primeiramente são solicitados os dados da Moenda, como tamanho em polegadas, rotação máxima, rotação mínima, torque em Nm, conforme ilustrado na tabela 4.2:

Tabela 4.3: Principais dados da Moenda

DADOS DO CLIENTE		
Motor Sugerido (KW)		Rotação moenda
Rotação Máxima (rpm)	1200	7,1
Rotação Mínima (rpm)	600	3,5
Torque saída Moenda (N.m)	1.814.850	
Rendimento (%)	96%	
Torque incluso Rendimentos (N.m)	1.890.469	
Relação (1 : ____)	170	
Torque Requerido no motor(N.m)	11.120	1397

Em seguida, com base no torque da carga, e nas rotações mínima e máxima, é especificado o motor elétrico adequado à partida deste sistema:

Tabela 4.4: Motor especificado para a Moenda

MOTOR ESPECIFICADO	
Potência Motor (KW)	1.570
Rotação Nominal (rpm)	1195
Torque rot. nominal do motor (N.m)	12.547
Torque do motor rot. Mínima (N.m)	10.665
Torque do motor rot. Máxima (N.m)	11.025

Finalmente são obtidas as curvas do motor especificado e da carga (moenda) para toda a faixa de rotação desejada. A curva dos motores terá sempre que se sobrepor a curva da carga. Tem-se duas curvas para os motores, uma para motores com sistemas de refrigeração auto ventilados, que possuem menor desempenho em baixas rotações e motores com refrigeração forçada, que possuem melhor desempenho em baixas rotações. Os motores com refrigeração forçada possuem maior custo.

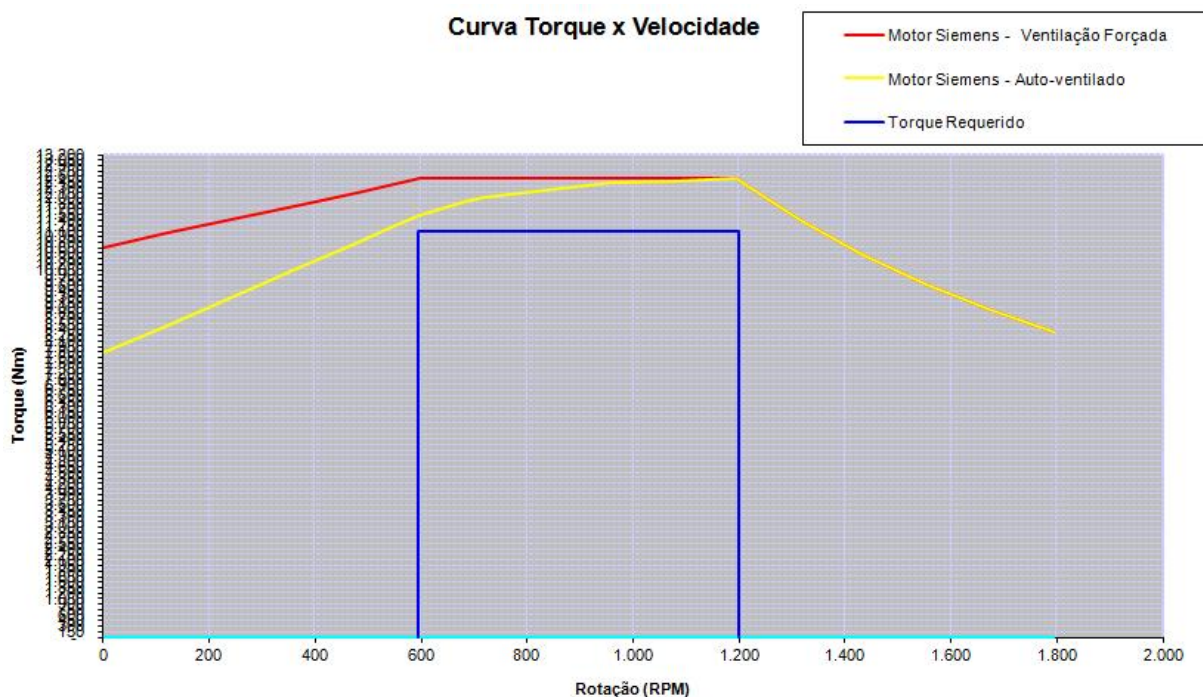


Figura 4.15: Curvas de Torque x Velocidade motores e moendas.

4.2.2 SISTEMAS DE PARTIDA DE MOTORES

Para os motores elétricos especificados para Picadores, Desfibrados e Moendas, deverá ser definido um sistema de partida e controle de velocidade (quando aplicável), que se adeque as necessidades de regimes de operação de cada uma das aplicações. Para Picadores e Desfibradores normalmente são aplicadas sistemas de partida direta na rede, **Soft Starters** ou sistemas de transferência Síncrona ou Assíncrona para a rede, através de conversores de frequência utilizados nos ternos de moenda.

Para os motores dos ternos de moenda, devido à necessidade de variação de velocidade do processo, são aplicados comumente Conversores de frequência de Baixa ou Média Tensão, dependendo da potência dos motores da Moenda.

4.2.2.1 PARTIDAS DIRETAS

Nos sistemas de partida direta de motores elétricos, aplica-se diretamente tensão nominal nos terminais dos motores, ou seja, os motores são conectados diretamente a rede de alimentação, através do fechamento de um contator ou disjuntor de entrada, conforme ilustrado na figura 4.16.

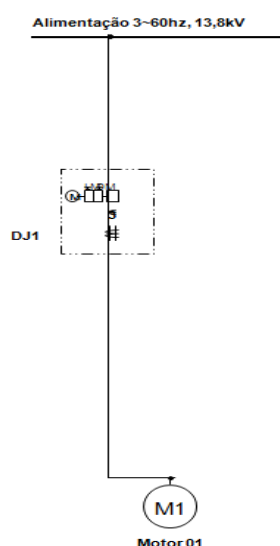


Figura 4.16: Esquemático de Partida direta de Motor em Média Tensão.

É a solução de partida de motores mais simples e de menor custo disponível no mercado, porém apresenta seus prós e contras, para determinadas aplicações. Nestes sistemas de partida os motores partem com torque nominal e possuem menor tempo de partida, ou seja, o tempo de aceleração até a rotação nominal é

bem reduzido, quando comparado aos outros métodos. Por outro lado apresentam também correntes de partida elevadas, entre 5 a 8 vezes a corrente nominal do motor e como consequência, provocam quedas de tensão na rede de alimentação. Por norma, estas quedas ou afundamentos de tensão na rede de alimentação não deverão ser maiores que 10%. Os níveis de corrente de partida podem ser observados na figura 4.17.

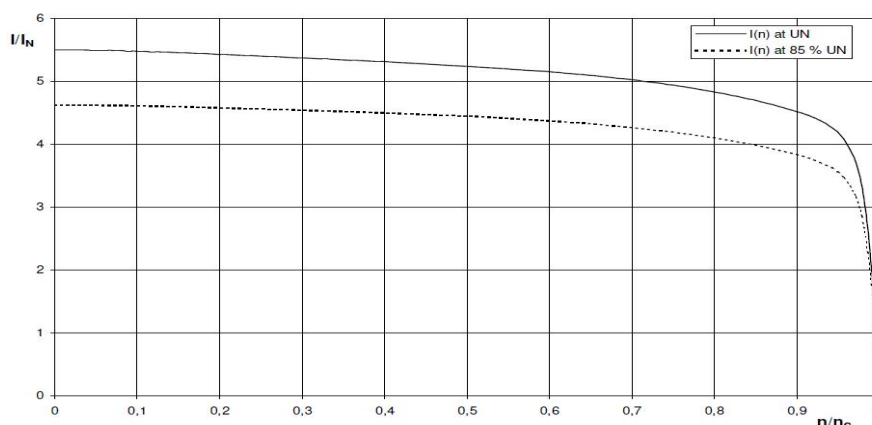


Figura 4.17: Corrente de pico em sistemas de partida direta de motores

Fonte: SIEMENS Ltda

Mecanicamente estes sistemas podem ocasionar estresses mecânicos nos acoplamentos entre os motores e as máquinas acionadas, aumentam os níveis de vibração dos equipamentos e ao longo do tempo estes estresses, podem reduzir a vida útil dos conjuntos motor e máquina acoplada.

Para picadores e desfibradores os sistemas de partida direta são aplicáveis para níveis de tensão de 13.8 kV e com a utilização de redutores de velocidade, visto que nesta faixa de tensão, devido as altas potências, a corrente dos equipamentos dos motores é baixa, podendo gerar níveis de queda de tensão dentro dos permitidos pelas concessionárias. Os redutores trabalharão como multiplicadores de torque, para vencer a inércia da carga. Como apresentado na curva a seguir, as partidas diretas fornecem torque nominal desde a partida, o que é ideal para as aplicações que requerem alto torque de partida, como os picadores e desfibradores.

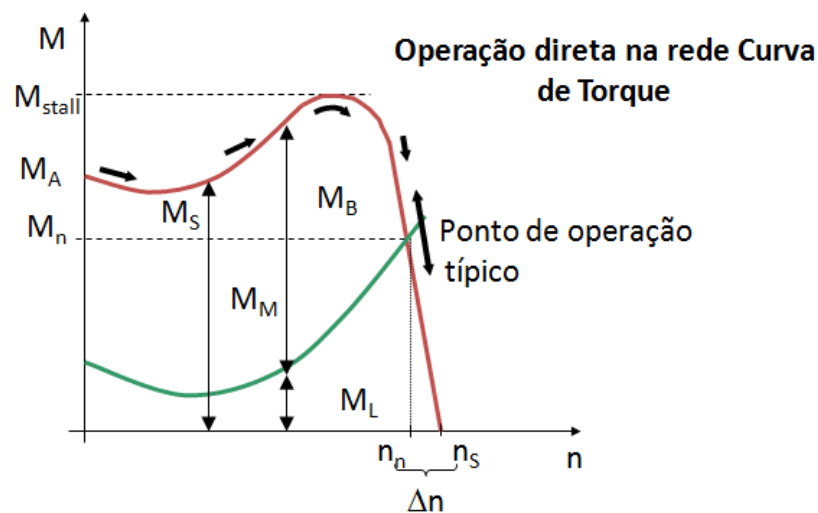


Figura 4.18: Curva de Torque de motores assíncronos em Partida direta

Fonte: SIEMENS Ltda

Utilizando sistemas de partida direta em picadores e desfibradores, o número de partidas consecutivas do motor fica limitado ao número máximo suportado pelo motor, devido aos limites térmicos. A maior parte dos motores de média tensão atuais possuem regimes de três partidas consecutivas a frio e duas partidas consecutivas a quente, conforme figura abaixo:

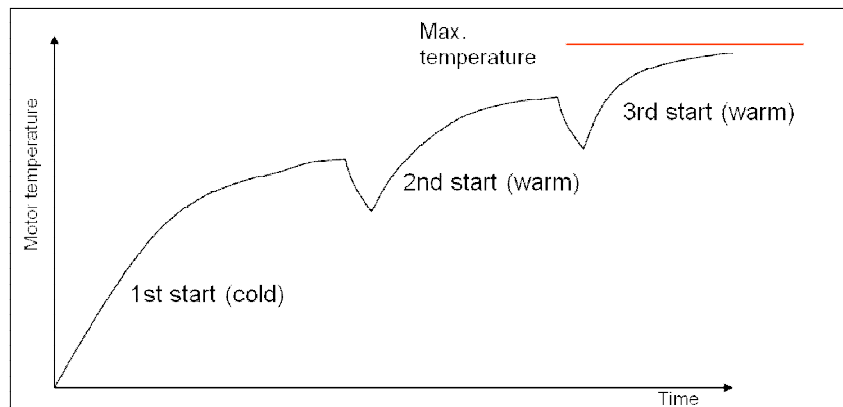


Figura 4.19: Partidas a frio e a quente de motores de média tensão.

Fonte: SIEMENS Ltda

Para Moendas os sistemas de partida direta não são aplicáveis, pois neles existe a necessidade de variação de velocidade, de acordo com a demanda e pela forma construtiva dos rolos do terno, os estresses mecânicos causados pelos sistemas de partida direta, poderiam comprometer a estrutura do terno.

4.2.2.2 PARTIDAS POR SOFT STARTER

Soft Starters ou Chaves de partida suave são dispositivos eletrônicos estáticos formados por dois ou três tiristores (SCRs – Retificadores Controlados de Silício) na configuração antiparalelo, figura 4.20. São utilizados para controle de partida e parada de motores elétricos.

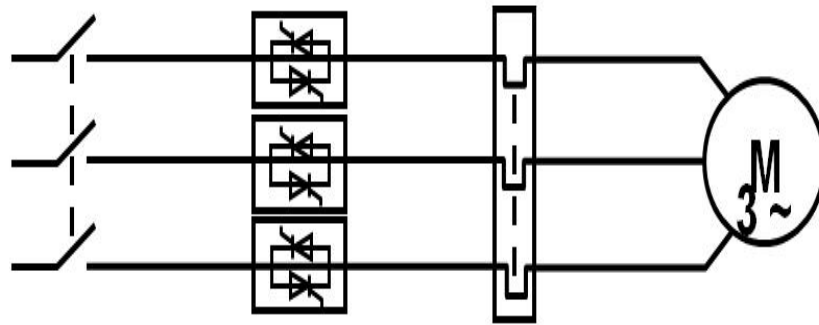


Figura 4.20: Motor acionado por Soft Starter (tiristores em antiparalelo).

Através de placas de controle internas, os SCRs são acionados ou disparados, com o objetivo de ajustar a tensão nos terminais de saída. O controle de tensão de saída obtido é possível graças a eletrônica determina o ângulo de disparo dos SCRs e desta forma consegue minimizar os níveis de corrente de partida do motor. Após a conclusão da abertura do ângulo de disparo, os SCRs passam a ser um curto circuito e o motor passa a operar em tensão plena, conforme figura 4.21.

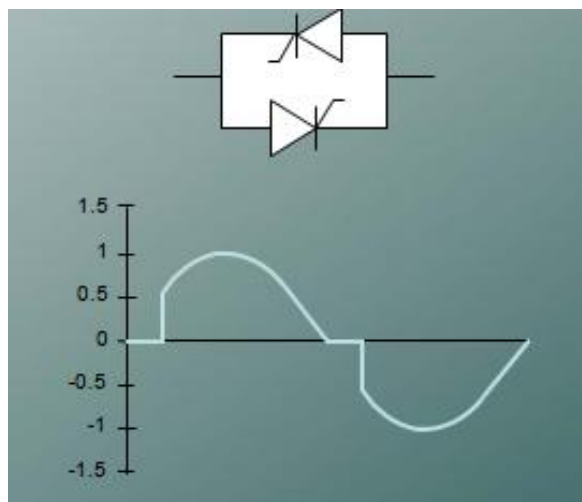


Figura 4.21: Ângulo de disparo de Tiristores em Soft Starters.

As *Soft Starters* têm como objetivo atuar na partida e parada suave motores elétricos, eliminando assim os picos de corrente de partida e os respectivos

estresses mecânicos nos acoplamentos entre motor e carga. Porém com a redução dos picos de partida, elas apresentam baixo torque de partida, que pode comprometer a partida de motores em aplicações com elevado torque de partida.

Para Picadores e Desfibradores, devido à alta inércia e elevado torque requerido na partida, as *Soft Starters* quase não são aplicadas. O mesmo acontece com os ternos de Moenda, porém nestes pela impossibilidade de variação de velocidade, visto que as *Softs* só são utilizadas na partida e / ou na parada de motores elétricos.

4.2.2.3 PARTIDAS POR CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

Conversores de Frequência ou Variadores de Frequência são dispositivos eletrônicos de potência estáticos, destinados a controlar a velocidade de motores elétricos, através da modulação de frequência por largura de Pulsos (PWM). São construídos internamente por três partes principais: módulo Retificador, *Link DC*(circuito intermediário) e módulo Inversor, conforme figura 4.22.

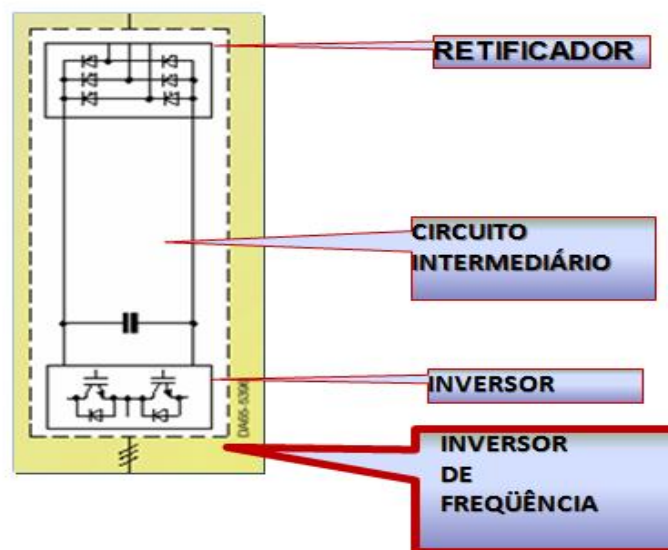


Figura 4.22: Conversores de Frequência.

Fonte: SIEMENS Ltda

Os conversores são alimentados por tensão trifásica senoidal com frequência fixa (50 ou 60 Hz), onde na sequencia esta tensão é retificada pelo módulo retificador e armazenada, no *link DC*, onde posteriormente esta tensão continua será convertida novamente para tensão alternada com frequência variável, conseguindo assim, variar a velocidade de motores elétricos.

Os circuitos retificadores podem ser controlados e não controlados e são constituídos por diodos ou tiristores, onde o número de diodos ou tiristores, determina o número de pulsos do retificador do conversor. Os retificadores podem ser de 6, 12, 18, 24, 30 ou 36 pulsos.

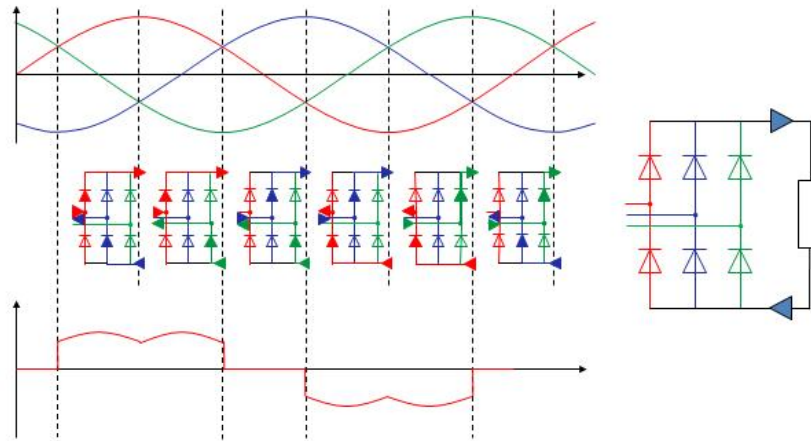


Figura 4.23: Retificador de 6 pulsos e forma de onda.

Fonte: SIEMENS Ltda

O número de pulsos determina a qualidade do sinal de saída dos conversores e o teor de harmônicos que o conversor irá gerar para a rede de alimentação, visto que são equipamentos não lineares e geram componentes de frequência também não lineares. Quanto maior o número de pulsos, mais próximo de uma senoide perfeita será o sinal de saída e teremos menor incidência de componentes de frequências não lineares, ou seja, harmônicos.

O Circuito intermediário é constituído por capacitores, responsáveis pelo armazenamento de energia proveniente do módulo de retificação e também são responsáveis pela alimentação do módulo inversor. O módulo inversor é responsável pela modulação de frequência por largura de pulsos, gerando a tensão alternada para alimentação do motor, conforme apresentado nas figuras abaixo:

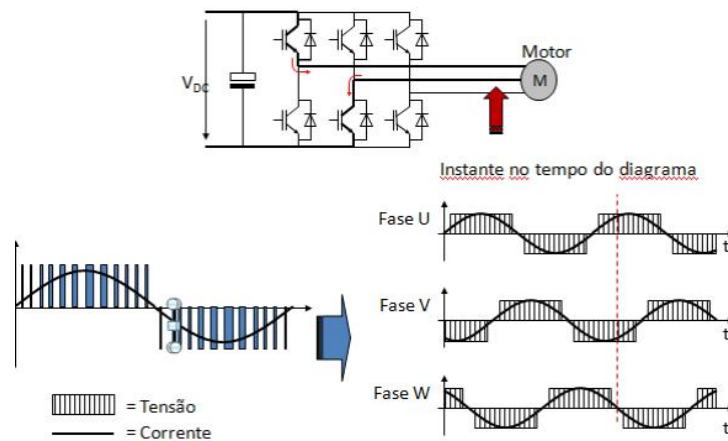


Figura 4.24: Modulação por largura de pulsos.

Fonte: SIEMENS Ltda

Nos sistemas de partida e controle de velocidade de motores elétricos por conversores de frequência as correntes de partida são limitadas a no máximo a corrente nominal, proporcionando partida suave e fornecem torque nominal desde a partida da carga, conforme ilustrado no gráfico de torque por velocidade da figura 4.25.

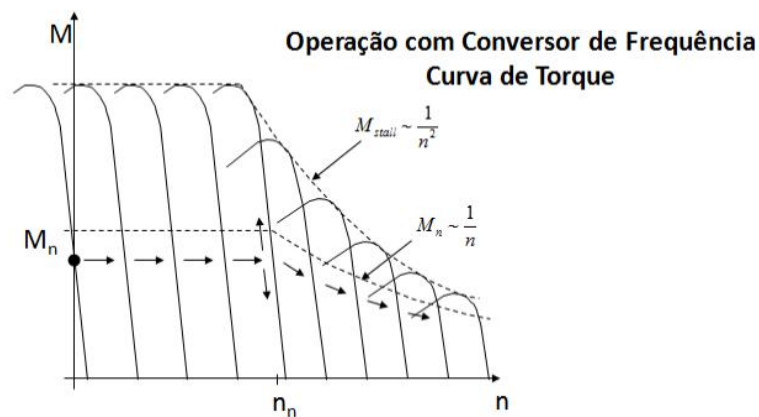


Figura 4.25: Curva de torque por velocidade em partidas com conversores de frequência.

Fonte: SIEMENS Ltda

Observa-se o princípio de modulação por largura de pulsos, atuando sobre a curva de torque do motor, trazendo vários pontos da curva para o ponto de operação ideal, proporcionando o torque nominal desde a partida. Os conversores de frequência também operam em frequências acima da frequência nominal do motor, em uma região chamada de região de **enfraquecimento de campo do motor**, porém com perda de torque, como também pode ser observado na figura 4.25. Após a rotação nominal, o conversor continua fornecendo torque para o

motor. Fornecem também altos torques mesmo em baixas rotações e correntes proporcionais aos torques requeridos com valores típicos de 1.0 a 1,5 vezes a corrente nominal.

Mesmo em baixas rotações, os conversores de frequência apresentam sempre altos níveis de rendimento, conforme apresentado no gráfico da figura a seguir:

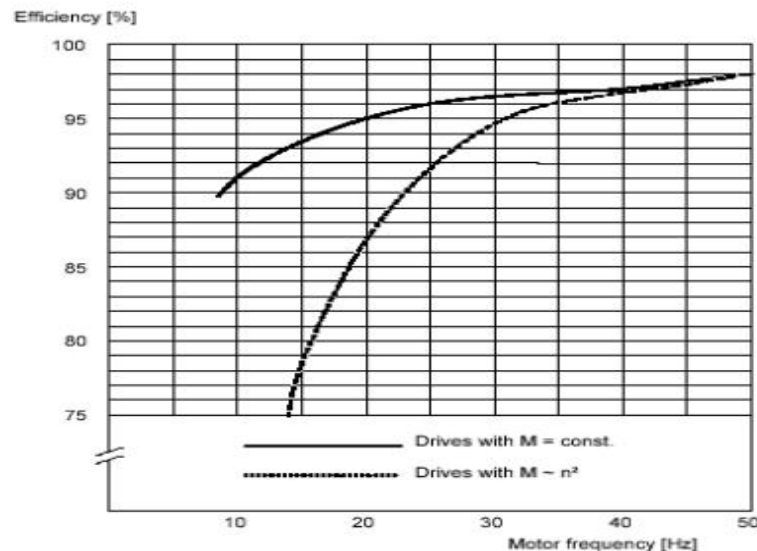


Figura 4.26: Curva de Eficiência de Conversores de Frequência

Fonte: SIEMENS Ltda

Observa-se que acima de 10% da rotação nominal do motor, os conversores de frequência já apresentam rendimentos superiores a 90% para cargas com características de torque constante, que é o caso de Picadores, Desfibradores e Moendas. Para cargas com característica de torque quadrático, os rendimentos são acima de 90% a partir de 25% da rotação e neste tipo de cargas se enquadram ventiladores, exaustores, bombas centrífugas, entre outras.

Pelos seus elevados níveis de eficiência, são os sistemas de partida e controle de velocidade que mais tem sido utilizado nos últimos anos, pois com o crescente desenvolvimento tecnológico, os seus principais componentes eletrônicos de potência como **IGBTs** (Transistor Bipolar de Porta Isolada) e **SCRs** estão cada vez mais com seus custos otimizados. Ainda são sistemas de partida com custos de aquisição elevados, quando comparados com os demais, porém quando bem aplicados proporcionam controle fino, economia de energia e eficiência energética

para os sistemas em que são aplicados, **principalmente em sistemas com variações de carga ou demandas durante seus ciclos de operação.**

4.2.2.3.1 CONVERSORES EM SISTEMAS DE PREPARO E EXTRAÇÃO

Nos projetos de eletrificação de sistemas de preparo e extração de os conversores de frequência são amplamente utilizados, pelas suas ótimas características de funcionamento, níveis elevados de rendimento, acima de 96% (considerando todo conjunto) e possibilidade de economia de energia com o controle de velocidade de demanda de acordo com a carga. São aplicados conversores de 6 e 12 pulsos em baixa tensão e conversores com 18, 24, 30 e 36 pulsos em sistemas de média tensão.

A definição depende dos níveis de potência dos motores das aplicações e também dos níveis de tensão disponíveis nas plantas de açúcar e etanol. Comumente as plantas têm disponíveis em baixa tensão, níveis de tensão de 460 Vca e 690 Vca e em média tensão 2.3 kV, 4.16 kV, 6.6 kV e 13.8 kV.

Podem ser aplicados em Picadores e desfibradores, proporcionando partida suave dos motores, eliminando os estresses mecânicos nos acoplamentos e são aplicados também em Moendas para partida e controle de velocidade dos ternos (rolos) das moendas.

4.2.2.3.1.1 CONVERSORES EM PICADORES E DESFIBRADORES

Em Picadores e Desfibradores os níveis de potência vão até 7000 CV e são sistemas em média tensão, normalmente em 4.16 kV, 6.6 kV e 13.8 kV, por isso aplicam-se conversores de frequência de média tensão. Nesta faixa de potência e tensão os custos dos conversores podem ser elevados e para otimização de recursos, são utilizados sistemas de transferência síncrona ou assíncrona para a rede, utilizando um único conversor de frequência para a partida sequencial dos motores do Picador e do Desfibrador. Com isto, aperfeiçoam-se custos, evitando a aplicação de dois conversores, um para cada sistema.

- **Sistema de transferência Síncrona:** sistema em média tensão, onde se aplica um único conversor de frequência para partida sequencial dos motores do picador e desfibrador, com o auxílio de transformadores dispositivos de manobra e proteção para transferência dos motores para a rede de

alimentação. Nestes sistemas os motores partem em vazio (sem carga), alimentados e controlados pelo conversor e quando atingem a rotação nominal é feita a transferência para a rede de alimentação. O sincronismo de tensão e frequência da rede com o sistema de partida efeito através de dispositivos auxiliares, evitando-se assim as altas correntes de partida, falta de inércia e torque de partida e estresses mecânicos nos acoplamentos presentes nos outros sistemas de partida. Reatores na saída do conversor são necessários para se evitar os picos de tensão na saída do conversor durante os processos de transferência para a rede. O diagrama unifilar a seguir ilustra o sistema de transferência assíncrona com conversor de frequência.

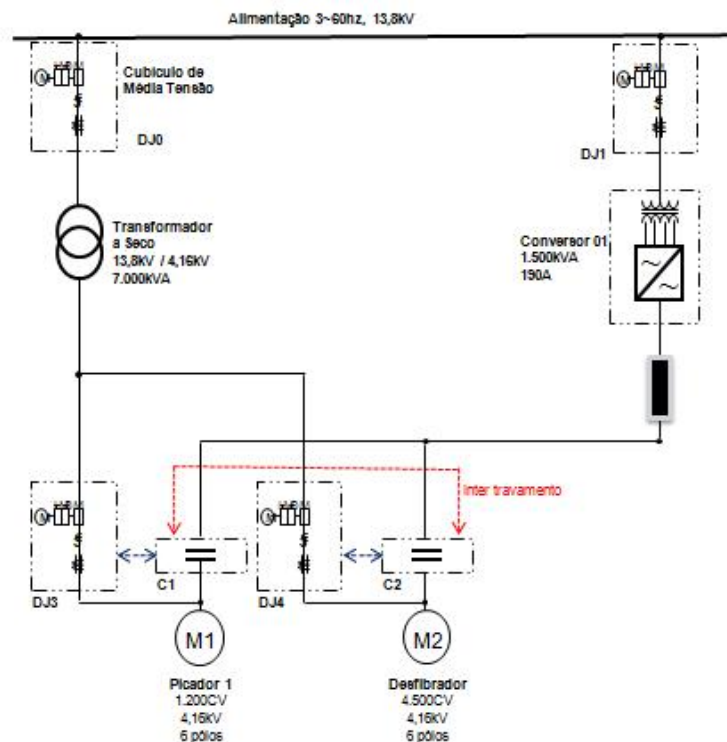


Figura 4.27: Sistema de Partida de transferência Síncrona de Motores do Preparo

O conversor 01 é alimentado pelo conversor de frequência e estes realiza a partida do picador (motor 01) e com o auxílio dos dispositivos C1 e DJ3 realiza a transferência para a rede do motor 01. Na sequência realiza o mesmo processo para o motor 02 (desfibrador) e com o auxílio dos dispositivos C2 e DJ4. Nestes sistemas a tensão de saída dos conversores é a mesma que a tensão de operação dos motores, neste caso, todos em 4.16 kV.

- Sistema de transferência Assíncrona:** semelhante ao sistema de transferência síncrona, porém neste sistema, os motores possuem níveis de tensão de operação diferentes da tensão de saída do conversor. Sendo assim, o conversor realiza a partida em vazio e sequencial dos motores, e faz a transferência assíncrona para a rede de alimentação. Não é feito o sincronismo de tensão e frequência da rede com o sistema, pois por alguns micro segundos o conversor retira a alimentação do motor e este passa a ser alimentado pela rede. Com isto tem-se um pequeno estresse mecânico no momento em que a rede assume o controle do motor. Neste caso reatores de na saída do conversor, não são necessários, pois o conversor retira a alimentação do motor, durante o processo de transferência assíncrona para a rede. O diagrama unifilar a seguir ilustra o sistema de transferência assíncrona.

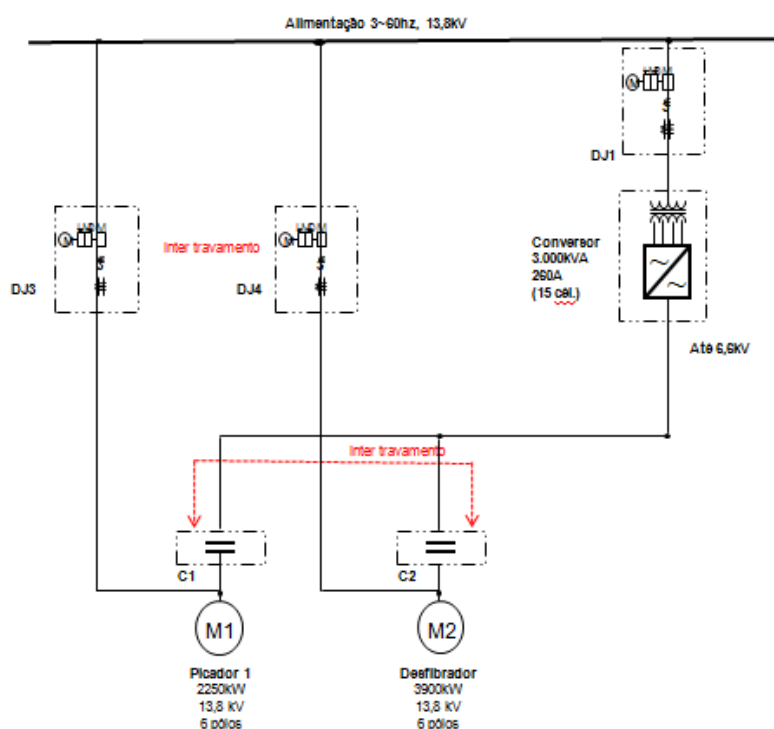


Figura 4.28: Sistema de Partida de transferência Assíncrona de Motores do Preparo

O conversor 01 realiza a partida do motor do picador em vazio e acelera até a tensão de 6.6 kV, em seguida através dos dispositivos C1 retira a alimentação do motor e entra o dispositivo DJ3 que alimenta o motor com tensão de 13.8 kV, realizando assim a transferência assíncrona do motor 01 para a rede. Na sequência o mesmo processo é repetido para o motor do Desfibrador, com o auxílio dos dispositivos C2 e DJ4.

Para picadores e desfibradores, dependo dos níveis de potência dos motores, também podem ser feitos sistemas de partidas individuais, ou seja, um conversor para cada motor, e também existem sistemas de partida com conversores e motores em Baixa tensão. Esta definição dependerá das características de cada projeto de eletrificação.

4.2.2.3.1.2 CONVERSORES EM MOENDAS

Os conversores de frequência proporcionam as moendas, controle de velocidade, de acordo com a demanda da planta, podendo operar com maior ou menor intensidade, conforme os períodos do ano e disponibilidade de matéria prima, proporcionado um controle fino nos processos e economia de energia. São aplicados conversores de média ou baixa tensão, dependo do tamanho das moendas em polegadas e conseqüentemente da potência dos motores nela aplicados. Os níveis de tensão mais comuns são os de 440 Vca, 460 Vca e 690 Vca em baixa tensão e em média tensão 2.3 kV, 4.16 kV e 6,6 kV.

Em Moendas os acionamentos por conversores de frequência podem ser feitos de forma única, ou seja, um conversor controlando todo o terno ou de forma individual, ou seja, um conversor controlando individualmente cada um dos quatro rolos do terno de moenda. Normalmente as usinas possuem de 1 a 6 ternos de moenda, logo se o acionamento for único teremos de 1 a 6 conversores aplicados e se o acionamento for individual, teremos 4 conversores por terno.

- **Acionamento Único:** são sistemas com até seis conversores de frequência, cada um acionando individualmente e controlando a velocidade de cada um dos motores do terno de moenda. Estes são sistemas de maior potência, motivo pelo qual normalmente se utilizam conversores em média tensão de 18, 24 ou 30 pulsos, dependendo dos níveis de tensão aplicados. O diagrama unifilar apresentado na figura 4.29, apresenta um esquemático típico de acionamento único de seis ternos de moenda de 74" em média tensão, 4.16 kV.

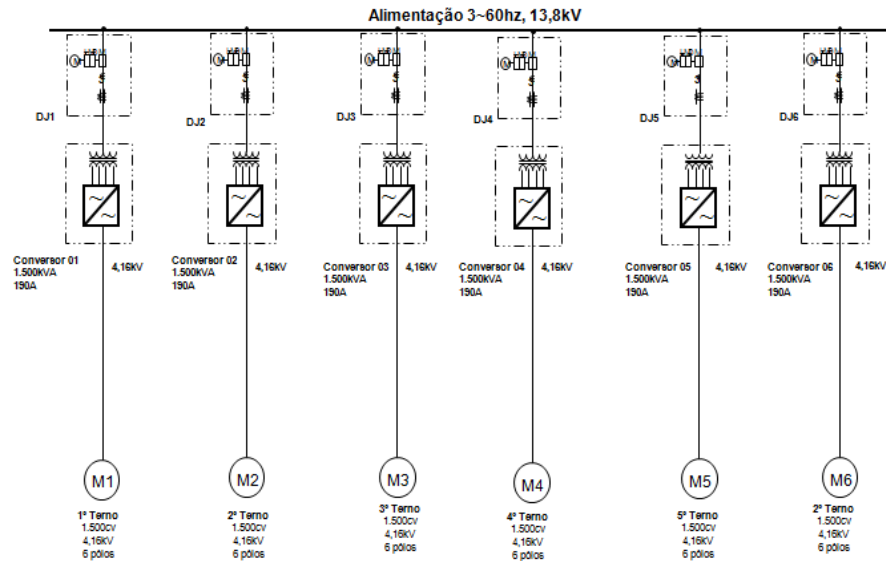


Figura 4.29: Acionamento de Seis ternos de Moenda com Conversores de Frequência

- Acionamento Individual (por Rolo):** este sistema de acionamento permite o controle de velocidade separado para cada rolo do terno de moenda. Como já destacado nos capítulos anteriores as moendas são constituídas por quatros rolos: rolo de pressão, rolo superior, rolo de entrada e rolo de saída. Cada um dos rolos é acionado por motor elétrico e conversor de frequência, com controle individual. Os motores para estes sistemas variam entre as potências de 100 CV a 1200 CV, por isso sugere-se a utilização de sistemas em baixa tensão nos níveis 440, 460 ou ainda 690 Vac. Por praticidade e redução de custos, utilizam-se sistemas de conversores 12 pulsos com barramento DC comum, onde é possível conectar vários inversores de frequência independentes em um único sistema, alimentados por único transformador, um único sistema de retificação e circuito intermediário. O diagrama unifilar apresentado na figura a seguir, ilustra o acionamento individual de cada um dos rolos de um terno de moenda.

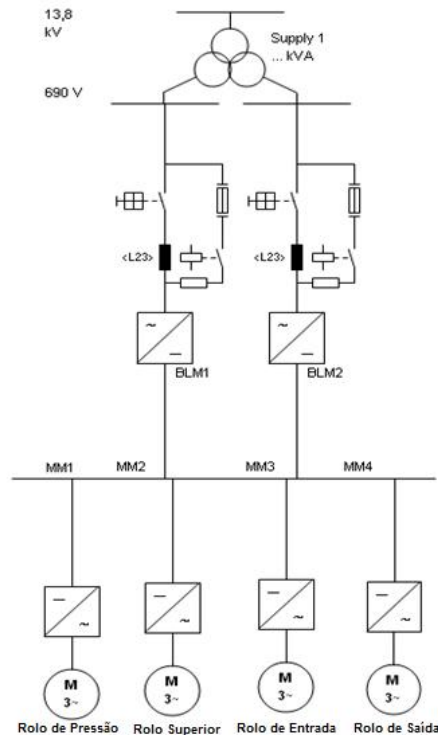


Figura 4.30: Acionamento dos rolos de um terno de Moenda com Conversores de Frequência

Observa-se um transformador de três enrolamentos (duplo secundário), alimentando um sistema de retificação de 12 pulsos com quatro inversores independentes acionando cada um dos motores dos rolos do terno de moenda.

4.2.2.3.1.3 SISTEMAS HÍBRIDOS (PREPARO + MOENDAS)

Para otimização de custos e ganho de competitividade, quando aplicáveis, surgem os sistemas híbridos em média tensão, que consistem na utilização do conversor de frequência do primeiro terno de moenda para acionar os motores do preparo: Picador e Desfibrador. Para tal utilizam-se os sistemas de transferência síncrona ou assíncrona, já apresentados neste trabalho, para partida sequencial e transferência para a rede dos motores do preparo e após estas o mesmo conversor de frequência parte e controla a velocidade do primeiro terno de moenda.

No diagrama unifilar apresentado na figura 4.31, tem-se a distribuição dos sistemas híbridos, para um sistema de partida de motores do preparo utilizando o conversor de frequência do primeiro terno de moenda, via transferência assíncrona.

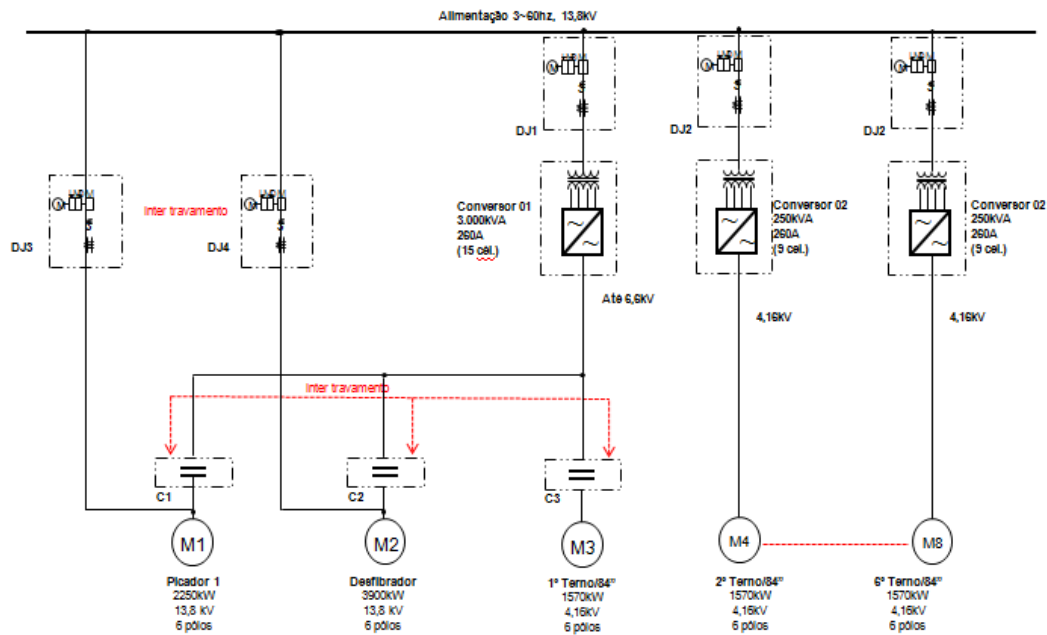


Figura 4.31: Acionamento dos rolos de um terno de Moenda com Conversores de Frequência

O Conversor 01 parte primeiramente o motor M1 (picador de cana), na sequencia faz a transferência assíncrona para a rede e em seguida parte o motor M2 (desfibrador) e também faz a sua transferência assíncrona para a rede. Posteriormente o mesmo Conversor 01, faz a partida e controle de velocidade do primeiro terno de moenda. Os demais ternos têm a sua partida e controle de velocidade por conversores independentes. Com isto reduzem-se os custos com aquisição de conversores dedicados apenas para partida de motores do preparo.

4.3 PROBLEMAS DE APLICAÇÃO – HARMÔNICOS

Os Conversores de frequência são dispositivos eficientes e como pudemos observar são extremamente importantes no processo de eletrificação de sistemas de preparo e extração em usinas de açúcar e etanol, porém são cargas que não apresentam um comportamento linear ao longo do tempo e por este motivos são também geradores de harmônicos.

De acordo com De SOUZA (2013), os harmônicos ou distorções harmônicas são tensões e correntes com correspondentes múltiplos e inteiros da frequência fundamental. Sendo um sinal periódico, podemos nos basear na série trigonométrica de *Fourier*³, que descreve como todo o sinal pode ser decomposto em uma sucessão de senoides. Assim como o instrumento musical Harmônica, os harmônicos dos sinais elétricos têm suas frequências próprias e amplitudes, múltiplas da frequência fundamental que têm como resultado um sinal de saída distorcido, conforme apresentado na figura a seguir:

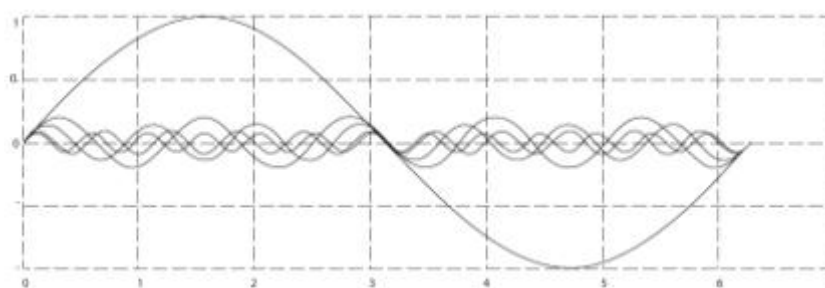


Figura 4.32: Forma de onda senoidal da fundamental e suas decomposições

Fonte: SOUZA, 2012

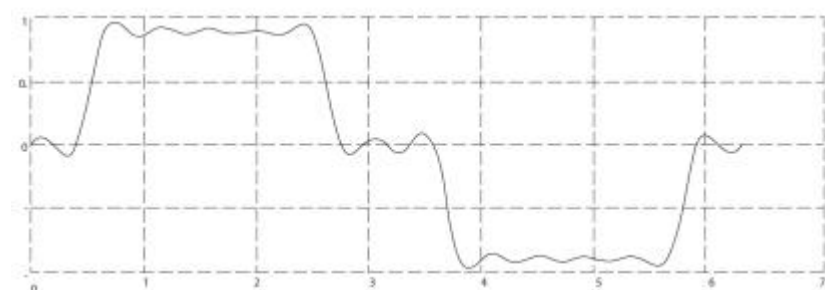


Figura 4.33: Forma de onda senoidal da fundamental somada às senoides harmônicas com períodos iguais a múltiplos inteiros da fundamental.

Fonte: SOUZA, 2012

³ **Jean-Baptiste Joseph Fourier** foi um matemático e físico francês, celebrado por iniciar a investigação sobre a decomposição de funções periódicas em séries trigonométricas convergentes chamadas séries de Fourier e a sua aplicação aos problemas da condução do calor. A transformada de Fourier foi designada em sua homenagem.

Em conversores de frequência os harmônicos característicos gerados dependem do número de pulsos do circuito retificador e obedecem a fórmula a seguir:

$$In = P * n \pm 1 (7)$$

Onde:

In = Harmônico de corrente de ordem "n";

n = número inteiro consecutivo ($n=1,2,\dots$);

P = número de pulsos do conversor;

Sendo assim, conversores com retificadores de 6 pulsos geram harmônicos predominantes em 5ª e 7ª ordem, retificadores de 12 pulsos geram harmônicos predominantes em 11ª e 13ª ordem... Quanto menor a ordem do harmônico, maior a sua amplitude e maior os níveis de distorção causados por estes.

Os níveis de distorção são classificados pelas expressões: THDi (Distorção Harmônica de Corrente) e THDv (Distorção Harmônica de Tensão). E estes índices determinam os níveis de qualidade de energia das plantas industriais, de acordo com os níveis estabelecidos pelas normas, onde se destacam a IEEE 519, que define os níveis de distorção de tensão e corrente no ponto de conexão comum (PCC) de cargas em instalações industriais, conforme tabela abaixo:

Tabela 4.5 - Limites de Distorção total de Tensão e Corrente pela IEEE 519

Ratio of short-circuit current/ max. current consumption	Permissible values for each individual harmonic voltage	Typical users
10	2.5 – 3 %	Special customers with special agreements
20	2.0 – 2.5 %	1 – 2 large loads
50	1.0 – 1.5 %	A few high-output loads
100	0.5 – 1 %	5 – 20 medium-output loads
1000	0.05 – 0.1 %	A large number of low-output loads

Permissible voltage levels at the PCC for each individual load

The following limits apply to the sum of all loads connected to the PCC:

Voltage at the PCC	Permissible value for each individual harmonic voltage	Permissible value for the total harmonic distortion THD(V)
$V_{Line} \leq 69 \text{ kV}$	3 %	5 %

Permissible voltage levels at the PCC for the sum of all loads

Fonte: IEEE 519 – 1992

Níveis elevados de distorções harmônicas trazem sérios problemas em equipamentos e instalações elétricas. As principais são listadas abaixo:

- Aquecimento de condutores Neutros;

- Produzem esforços adicionais no eixo de máquinas rotativas (motores e geradores) e contra-torque no eixo da máquina;
- Produzem perdas adicionais no ferro e no cobre das máquinas;
- Bancos de capacitores podem ser afetados principalmente por harmônicos de quinta ordem;
- Correntes harmônicas são correntes reativas, pioram o fator de potência total, logo demandam uma maior potência do sistema de geração para uma mesma potência ativa da carga.
- Afetam a isolação de motores, transformadores e cabos;
- Afetam a operação de aparelhos eletrônicos sensíveis;
- Os conversores são fontes de harmônicos, mas também podem ter o funcionamento afetado devido à outras fontes de harmônicos

Para garantir níveis aceitáveis de qualidade de energia e se minimizar os problemas causados por harmônicos ou mesmo mitigá-los, têm-se as soluções apresentadas a seguir:

- Segregação de cargas em diferentes transformadores, principalmente equipamentos de características distintas (**CLPs**⁴, Máquinas de solda, iluminação);
- Transformadores dedicados para conversores de grande porte;
- Aplicação de reatores de linha em conversores de grande porte alimentados por transformadores não dedicados;
- Utilização de conversores de frequência de baixa tensão de 12 pulsos ou mais, pois os harmônicos gerados são de menor intensidade;
- Utilização de sistemas conversores de frequência de baixa tensão de 12 Pulsos, com barramento DC comum;
- Utilização de Conversores de Média tensão com topologia multi células e transformadores defasadores integrados (18 24, 30 e 36 pulsos);
- Utilização de filtros de harmônicos ativos e passivos;

⁴ **CLP** – Controladores Lógicos Programáveis, computadores eletrônicos que desempenham funções locais e cálculos matemáticos em sistemas e processos industriais.

4.4 PRINCIPAIS GANHOS COM A ELETRIFICAÇÃO

A eletrificação de sistemas de preparo e extração tem como objetivo principal o aumento da disponibilidade de vapor na planta, visando assim, incrementar a capacidade de geração de eletricidade para exportação. Na maior parte dos casos as usinas conseguem aumentar a capacidade de energia exportada em no mínimo 10%. Isto representa ganhos financeiros significativos para o setor ao longo dos anos, aumentando também a competitividade dos outros produtos fabricados nas usinas como açúcar e etanol.

A tabela a seguir, apresenta um comparativo entre a produção de energia para exportação em um sistema com acionamentos mecânicos e em um sistema com acionamentos elétricos, com todos os dados de moagem de cana, consumo específico de vapor, balanço de massa e balanço de potência elétrica gerada:

Tabela 4.6 - Comparativo Cenário Mecanizado x Eletrificado

Moagem horária ^α	408,5 t/h ^α	
Cenário ^α	Mecanizado ^α	Eletrificado ^α
→ <i>Consumo específico médio por tonelada de cana</i> →		
Energia elétrica ^α	22 kWh/t ^α	30 kWh/t ^α
Vapor de processo industrial ^α	450 kg/t ^α	450 kg/t ^α
Vapor de acionamento mecânico ^α	140 kg/t ^α	... ^α
→ <i>Balanço de massa</i> →		
Caldeira → ... ^α	193,8 t/h ^α	193,8 t/h ^α
Consumo de vapor de processo ^α	183,8 t/h ^α	183,8 t/h ^α
Consumo de vapor de acionamento ^α	57,2 t/h ^α	... ^α
Vapor de condensação ^α	10 t/h ^α	10 t/h ^α
→ <i>Balanço de potência elétrica</i> →		
Geração ^α	30,0 MW ^α	35,8 MW ^α
Demanda ^α	9,0 MW ^α	12,3 MW ^α
Exportação ^α	21,0 MW ^α	23,6 MW ^α
Ganho na exportação^α	+12,2%^α	

Fonte: SANTOS, 2012

Mesmo com o aumento do consumo interno de energia na planta, os ganhos na exportação representaram aumento de cerca de **12,2%** em relação a usina com acionamentos mecânicos.

Além dos ganhos na exportação de energia, a eletrificação promove um aumento de eficiência nos processos e em equipamentos. Este aumento de eficiência, por outros ganhos de extrema importância para as plantas eletrificadas. Os principais são resumidos a seguir:

- Automação do controle de vazão do caldo para a fábrica devido ao melhor ajuste da rotação dos ternos de moenda;
- Controle total à distância dos sistemas, através de protocolos de comunicação remota. Os dispositivos aplicados dispensam a presença de operadores no local para ajustes na rotação do terno, bem como partida e parada dos picadores e desfibradores;
- Eliminação das oscilações na extração do caldo, pois no caso de acionamentos mecânicos, as turbinas dependem da pressão do vapor.
- Instalação compacta e reduzida, pois são equipamentos menores e não necessitam de linhas de vapor de alta pressão e temperatura;
- Não existe a necessidade de água nos acionamentos, com isto, não é necessário redimensionar as linhas de vapor e de água de resfriamento;
- Redução das horas de parada para manutenção e intervenção.
- Operação com alto torque em baixas rotações, o que é difícil com sistemas mecânicos devido ao sistema de lubrificação;
- Eliminação do redutor de alta rotação nas moendas;
- Partidas e paradas suaves e em rampa, eliminando assim os estresses mecânicos nos acoplamentos entre equipamentos;
- Proteções dos motores e sistemas mecânicos totalmente integrados aos Conversores;
- Instalação mais limpa e segura.

4.5 PRINCIPAIS BARREIRAS PARA ELETRIFICAÇÃO

Os ganhos energéticos e de eficiência nos processos advindos dos projetos de eletrificação de sistemas de preparo e extração em Usinas de açúcar e etanol, são reais e comprovados, conforme análises apresentadas nos capítulos anteriores deste trabalho.

Porém a atual conjuntura econômica e política vivida pelo Brasil nos últimos anos reduziu o consumo de energia nas indústrias e até mesmo muitas delas acabaram por encerrar as portas ou reduzir os níveis de produção. Consequentemente muitos projetos voltados para a geração de energia elétrica foram postergados ou cancelados. Muitos leilões de energia de várias fontes, inclusive renováveis, também foram cancelados e postergados, pois a demanda por energia no Brasil caiu consideravelmente. Este cenário econômico atual se apresenta como uma das principais barreiras encontradas para a implementação de projetos de eletrificação, pois a eletrificação aumenta capacidade de exportação de energia das usinas para o SIN.

No mesmo panorama, o setor sucroenergético de um modo geral passa por momentos de ajustes, pois muitas usinas ainda se recuperam do período de crise, marcado pelo encerramento de várias usinas nos últimos anos, aumento do número de pedidos de recuperação judicial e até mesmo pedidos de falência. De acordo com a EPE, o quadro atual do setor sucroenergético, não é convidativo para abertura de novas usinas, expansões ou até mesmo projetos de *retrofit*⁵, onde se enquadram os projetos de eletrificação.

De um modo geral o cenário econômico e político atual no Brasil, congela recursos que potencializariam a implementação de projetos de eletrificação, pois os investimentos iniciais para implementação são altos e em momentos de crise, os recursos são escassos.

Resistências ou barreiras técnicas são normalmente contornadas com a apresentação de argumentos técnicos e simulações reais com projeção de cenários, comprovando os reais ganhos e benefícios dos projetos de eletrificação.

⁵ **Retrofit** termo utilizado comumente aplicado em engenharia para designar o processo de modernização de algum equipamento ou processo já considerado, inadequado ou ineficiente.

CAPÍTULO 05

5. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresentado neste trabalho trata de um projeto de eletrificação do primeiro Terno de Moenda de 78" em uma usina localizada no interior do estado de São Paulo. Esta unidade é responsável pela produção de açúcar cristal branco, açúcar cristal, álcool anidro carburante, álcool hidratado e energia elétrica. Processa cerca de 1,8 milhões de toneladas de cana, o que gera 3,7 milhões de sacas de açúcar cristal e 41 milhões de litros de álcool e possui autorização para emissão de créditos de carbono certificados pela Organização das Nações unidas (ONU).

Foi realizada a substituição de um sistema de acionamento mecânico por turbina a vapor mais redutor de velocidade, por acionamento elétrico, com a aplicação de motor elétrico de alto rendimento com variação de velocidade através de conversor de frequência e todos os equipamentos de proteção a montante destes.

Dados da Instalação:

- *Gerador de 25 MVA – 13.8 kV;*
- *Turbina de contrapressão: 63 kgf/cm²*
- **Capacidade de geração: 6 MW;**
- **Capacidade de Exportação 2 MW;**
- *Capacidade de Produção: 380 toneladas de cana por hora (tc/h);*
- **Eletrificação Primeiro Terno de Moenda de 78".**

Para ternos de moenda de 78", a potência mecânica requerida mínima recomendada para acionamento do terno fica **1450 CV**, com torque **1.447.123,00 Nm** e rotação entre **3,5 e 7 RPM**. Foi especificado um motor elétrico de baixa tensão, por preferência e questões de padronização de planta do cliente. As características do motor são apresentadas a seguir:

- *Potência Elétrica do Motor Especificado = 1200 kW – 1600 CV;*
- *Tensão Nominal: 690 Vca;*
- *Frequência nominal: 60 Hz*

- *Rendimento do Motor: 96%*
- *Fator de Potência: 0,88*
- *Nº de Pólos = 6 – 1200 RPM (rotação Síncrona);*
- *Torque Nominal = 8350 N.m em 1200 RPM;*
- *Torque na região de enfraquecimento de campo = 7.640 N.m em 1500 RPM;*
- *Dados de Operação: 1505 RPM, 692kW, 4531N.m (acima de 60 Hz);*
- *Transformador alimentador: 2x 875 kVA – 13,8 kV / 2x 690 Vca.*

Foi realizada a análise das curvas de torque por velocidade da carga com a curva do motor especificado, considerando todos os dados acima, inclusive dados de sobrecarga, conforme gráfico abaixo:

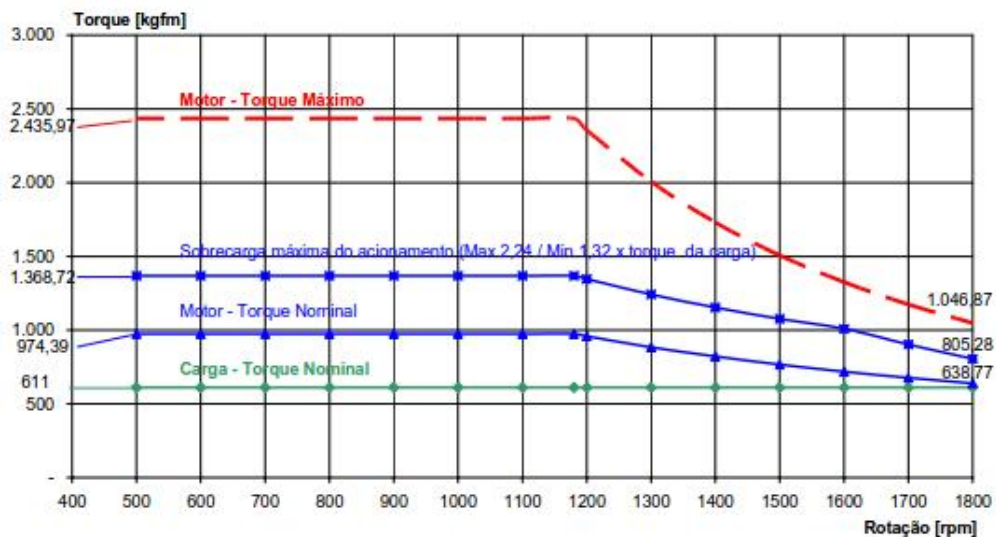


Figura 5.1: Curva de torque por rotação do motor especificado.

Observa-se que o torque nominal da carga (em verde), é atendido plenamente pelo torque nominal do motor especificado (em azul) em toda a faixa de operação da carga, inclusive na região de enfraquecimento de campo, após a rotação nominal.

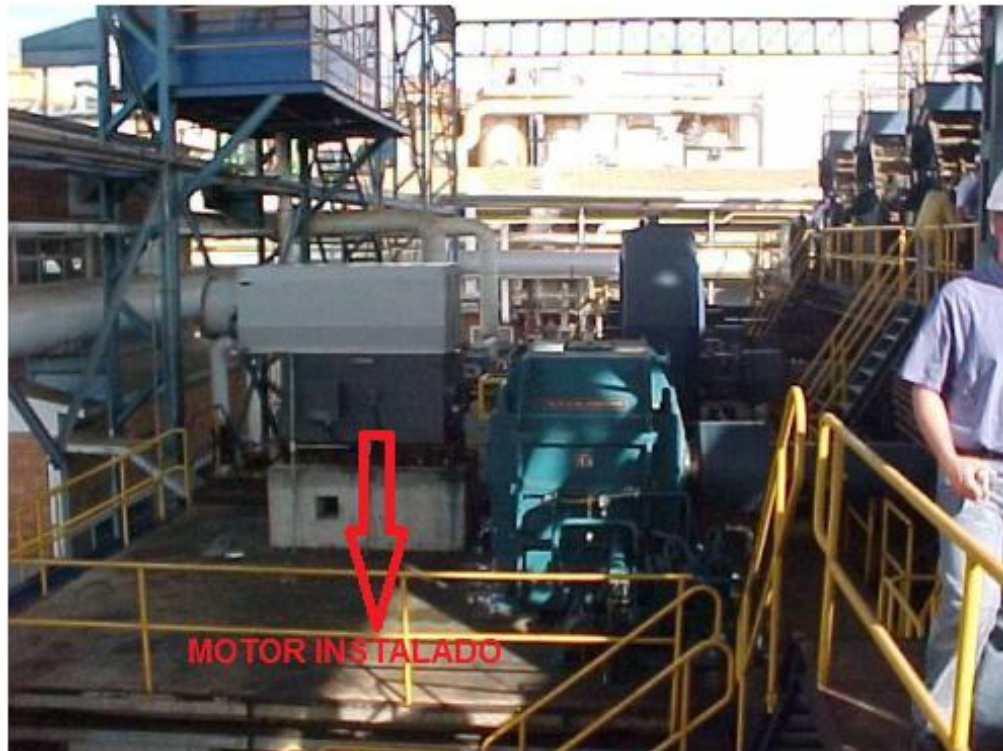


Figura 5.2: Motor elétrico na instalação, acoplado ao terno.

Posteriormente foi feita a especificação do Conversor de frequência, transformador e sistema de proteção para o acionamento. O diagrama unifilar a seguir apresenta o panorama geral da instalação:

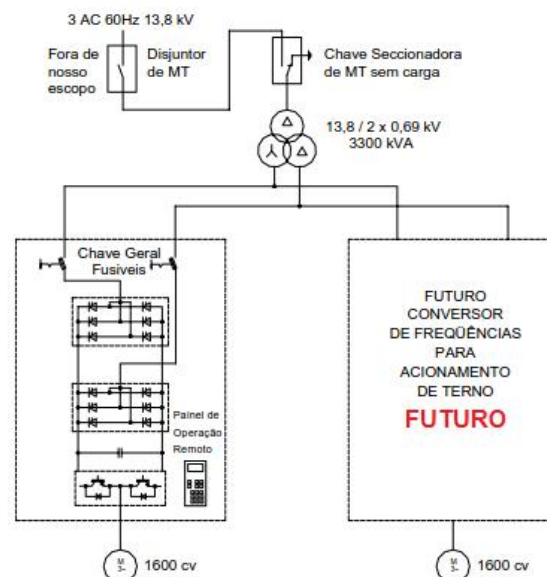


Figura 5.3: Diagrama unifilar do Acionamento.

O sistema é composto por cubículos de média tensão com chaves seccionadora e fusíveis ultrarrápidos a montante para proteção geral da instalação. Na sequência tem-se o transformador alimentador com três enrolamentos, pois para esta faixa de potência (1200 kW em baixa tensão), recomenda-se a utilização de conversores de frequência de 12 pulsos, para atenuação dos níveis de distorção harmônica, que podem ser gerados pelo conversor. Nesta primeira fase do projeto, foi feito o acionamento do primeiro terno, porém já se deixou preparada toda a infraestrutura para instalação do conversor para o próximo terno.

Os principais dados do Conversor de frequência são apresentados abaixo:

Tabela 5.1 - Dados Técnicos do Conversor de Frequência.

DADOS DO CONVERSOR	
Tipo de Retificador	12 Pulsos
Tensão de Alimentação / Saída	660 Vca - 690 Vca
Potência Nominal	1200 A
Corrente Nominal	1230 A
Corrente base torque Constante	1119 A
Corrente Sobrecarga por 1 min a cada 5 min	1673 A
Corrente de Entrada	2 x 677 A
Perda de Potência	30,7 kW
Vazão de ar para refrigeração	2 m ³ / s
Ruído	85 dB(A)
Grau de Proteção	IP 42
Acabamento final Externo do gabinete	RAL 7030
Dimensões (AxLxP)	2300x4500x600
Peso	2400 kg

O Conversor especificado de 12 pulsos, com o respectivo transformador alimentador foram integrados em um mesmo gabinete e instalados em salas elétricas climatizadas, previamente preparadas pela usina. Para especificação do conversor de frequência, a corrente nominal do conversor deverá ser maior que a corrente nominal do motor, bem como a tensão nominal deverá ser a mesma do motor. Por se tratar de uma aplicação com característica de torque constante, são aplicáveis sobrecargas de até 150% sobre a corrente nominal do motor e conversor dimensionado para atender esta corrente de sobrecarga por um minuto a cada ciclo de cinco minutos, conforme dados apresentados na tabela 5.1. A visão geral do gabinete pode ser observada nas figuras abaixo:

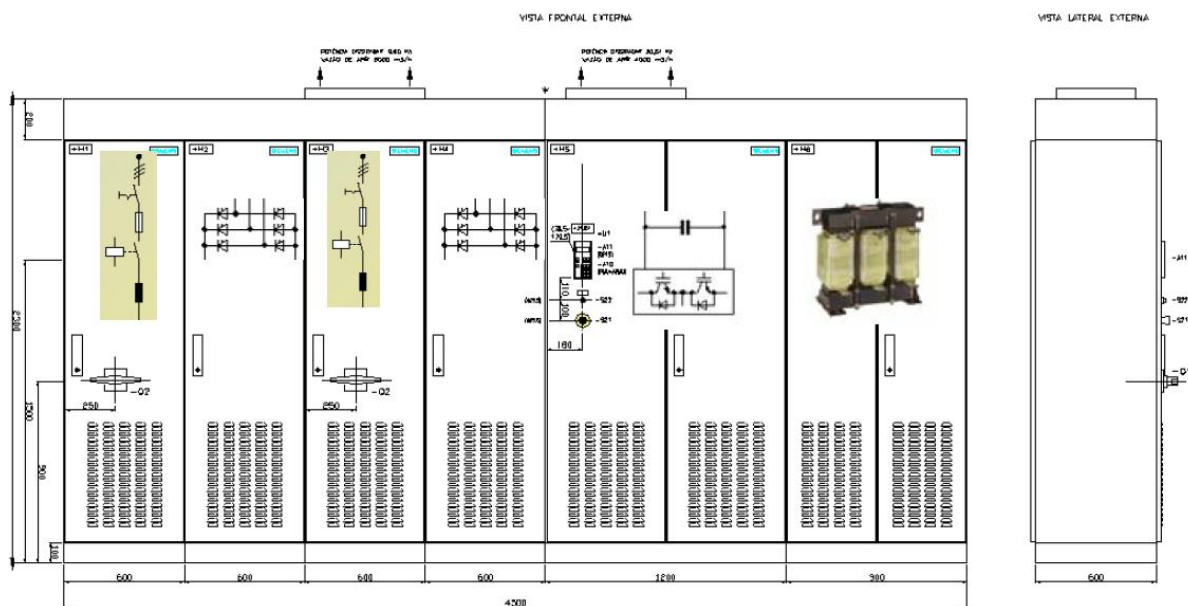


Figura 5.4: Visão geral do Painel do Conversor e Transformador.



Figura 5.5: Painel do Conversor de Frequência em Sala elétrica.

Com os equipamentos instalados, foi feito o cálculo do consumo de energia do sistema, com os valores medidos na entrada do transformador:

- *Corrente de Linha (I) = 32,9 A;*
- *Tensão de Linha (U) = 13.8 kV;*
- *Fator de potência médio do Conversor = 0.965;*

Logo:

A potência aparente é dada por:

$$S = U * I * \sqrt{3} = 32,9 * 13,8 * \sqrt{3} = 786,40 \text{ kVA (8)}$$

A potência ativa é dada por:

$$P = S * \cos \varphi = 786,40 * 0,965 = 758,90 \text{ kW (9)}$$

Os valores medidos no painel de operação do inversor, durante os testes foram:



Figura 5.6: Medição no painel de operação do Conversor.

- Rotação: 1509,9 RPPM;
- Torque aplicado à carga: 47,4% do valor nominal;

Logo:

A potência mecânica é dada por:

$$P_m = \frac{\text{Torque da Carga (M)} * \text{Rotação}}{9550} = \frac{6.614.364,57}{9550} = 692,60 \text{ kW (10)}$$

Com as potências calculadas, é possível determinar os níveis de rendimento do sistema de acionamento elétrico (Considerando transformador, Conversor de frequência e motor):

$$n = \frac{P_m}{P} = \frac{692,60}{758,90} = 91,26\% \text{ (11)}$$

Ou o rendimento do sistema de acionamento elétrico pode também ser calculado pelos rendimentos individuais de cada equipamento (transformador, Conversor de frequência e motor):

- Rendimento transformador = 98%;
- Rendimento Conversor = 97%;
- Rendimento Motor = 96%;

Logo teremos:

$$n = 0,98 * 0,97 * ,96 = 91,26\%$$

O rendimento geral do sistema, considerando todos os conjuntos incluindo os turbogeradores será o seguinte:

- Rendimento da turbina: 87%;
- Rendimento do Redutor: 98%;
- Rendimento do Gerador: 97%;
- Rendimento do Acionamento Elétrico: 91,26%;
- Redutor: 96%.

Logo teremos:

$$n = 0,87 * 0,98 * 0,97 * 0,9126 * 0,96 = 72,45\%$$

Com isto, foi possível comprovar que o rendimento dos sistemas de acionamentos elétricos é superior aos sistemas de acionamentos mecânicos, com dados de medições de campo e cálculos realizados no neste estudo de caso.

Com os rendimentos calculados foi possível estimar a economia de energia gerada pelo sistema de acionamento elétrico. Sendo assim, teremos:

- Potência Requerida pela carga = 692,60 kW;
- Rendimento total do Sistema de acionamento elétrico = 0,7245

Logo a potência requerida na entrada do sistema ou turbina é de:

$$\frac{692,60}{0,7245} = 956,00 \text{ kW}$$

Para o sistema mecânico temos:

- Rendimento total do sistema de acionamento mecânico: 0,65;

Logo a potência requerida na entrada do sistema ou turbina é de:

$$\frac{692,60}{0,65} = 1066,00 \text{ kW}.$$

A diferença de potência entre os sistemas será:

$$1066,00 \text{ kW} - 956,00 \text{ kW} = 110 \text{ kW}.$$

Com base nestes valores, a economia de energia com o novo sistema será:

- Diária: $110 \text{ kW} * 24 \text{ hrs} = 2640 \text{ kWh}$;
- Mensal: $2640 \text{ kWh} * 30 \text{ dias} = 79.200 \text{ kWh} / \text{mês}$.
- Anual (base 8 meses – safra): $79.200 \text{ kWh} * 8 \text{ meses} = 633.6 \text{ MWh} / \text{ano}$.

Considerando o custo de energia mercado livre a $30 \text{ USD} / \text{MWh}$ teremos:

- Economia anual: $633.6 \text{ MWh} / \text{ano} * 30 \text{ USD} = 19.008,00 \text{ USD}$.

Os níveis elevados de eficiência apresentados pelos componentes do sistema de acionamento elétrico, confirmam que com sistemas mais eficientes, a energia aplicada para realizar os mesmos processos de uma forma geral, é bem menor. Isto garante otimização de resultados, ganhos financeiros e competitividade.

Para este projeto os principais ganhos obtidos foram:

- Excedente de energia para exportação estimado de **750 a 1000 kWh**;
- O sistema conta com protocolos de comunicação **Profibus**⁶, o que permite que o operador controle a máquina remotamente;
- Ajuste de rotação, inclusive acima da rotação nominal do motor, possibilitando ajustes finos, de acordo com as necessidades do processo;

⁶ **PROFIBUS** – da junção de Process Field Bus é um dos protocolos de comunicação remota mais popular entre os sistemas de comunicação em rede Fieldbus.

- Redução de linhas de vapor de alta pressão onde se tem a presença de operadores;
- O sistema de acionamento elétrico pode operar com alto torque em baixa rotação, o que é difícil em sistemas mecânicos devido ao sistema de lubrificação;
- Eliminação do Redutor de alta velocidade, tornando a instalação mais limpa;
- Proteção do Sistema mecânico, totalmente integrada ao conversor;

Todos os resultados esperados com o projeto de eletrificação do primeiro terno de Moenda de 78", foram alcançados dentro da usina e como consequência já estão em curso estudos para implementação do projeto de eletrificação dos demais ternos durante a próxima entre safra.

5.1 IMPORTÂNCIA DO RENDIMENTO PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os resultados obtidos neste estudo de caso mostraram a importância da aplicação de sistemas cada vez mais eficientes nos processos industriais. No caso de motores elétricos, esta importância é ainda maior, pois para estes, quanto maior o rendimento e menor as perdas nos conversores de frequência, menor será o consumo de energia na planta. Os motores são as cargas que detêm as maiores potências instaladas nas industriais e conseqüentemente apresentam os maiores níveis consumo de energia.

O gráfico ilustrado na figura a seguir apresenta a relação entre o ciclo de vida útil dos motores em relação a sua potência em kW, bem como a representatividade de custos em um motor elétrico.

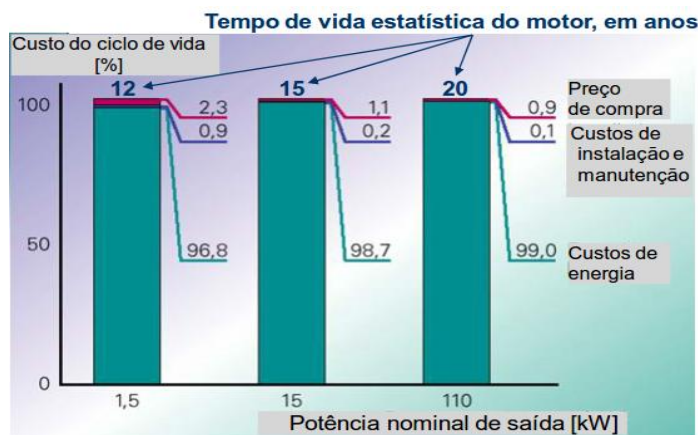


Figura 5.7: Ciclo de vida dos motores elétricos de indução.

Fonte: Motor lifetime DKI Info 09/99.

Observamos que motores com maior potência possuem maior tempo de vida útil, chegando a operar por até 20 anos. Observamos também que independentemente da potência do motor, os custos com energia elétrica, representam mais de 96% dos custos do motor, no caso de motores de baixas potências e até 99% no caso de motores de altas potências. Custos de manutenção vêm em seguida e os posteriormente os custos de aquisição.

Com base nos dados do gráfico da figura 66, aplicamos os custos dos equipamentos implementados no projeto de eletrificação do estudo de caso, para termos uma ideia dos valores envolvidos ao longo de 20 anos. Consideramos a substituição de sistema de acionamento elétrico (transformador, Conversor e motor) após 10 anos, para que o sistema possa operar com níveis elevados de eficiência até aos 20 anos esperados. Os resultados obtidos são apresentados a seguir:

Tabela 5.2 - Cálculo dos custos de energia durante 20 anos.

		Ano 1		Ano 10		Ano 20	
Potência do Motor	kW	630					
Rendimento do motor	%	95%					
Rendimento do inversor	%	97%					
Rendimento do transformador	%	98%					
Potência requerida da rede	%	698					
Custo da energia elétrica	USD/MWh	30					
Periodo de trabalho	h	24					
Dias de trabalho anual	dia	350	Ano 1		Ano 10		Ano 20
Gasto anual em energia	USD	175.896,00	58%	1.758.960,00	92%	3.517.920,00	94%
Custo do Acionamento(Trafo+Inversor+Motor)	USD	100.000,00	33%	100.000,00	5%	100.000,00	3%
Custo de instalação	USD	20.000,00	7%	20.000,00	1,1%	20.000,00	0,5%
Custo de Manutenção	USD	10.000,00	3%	25.000,00	1,3%	100.000,00	2,7%
Custo Total	USD	305.896,00	100%	1.903.960,00	100%	3.737.920,00	100%

Já após o primeiro ano de operação, os custos de energia representarão 58% dos custos totais e após 10 anos, os custos de energia quase dobram representando 92% dos custos totais, ou seja, os custos totais que após o primeiro ano eram de USD 305.896,00, após 20 anos representam USD 3.737.920,00. O gráfico apresentado na figura 5.8 ilustra com clareza a representatividade destes números.

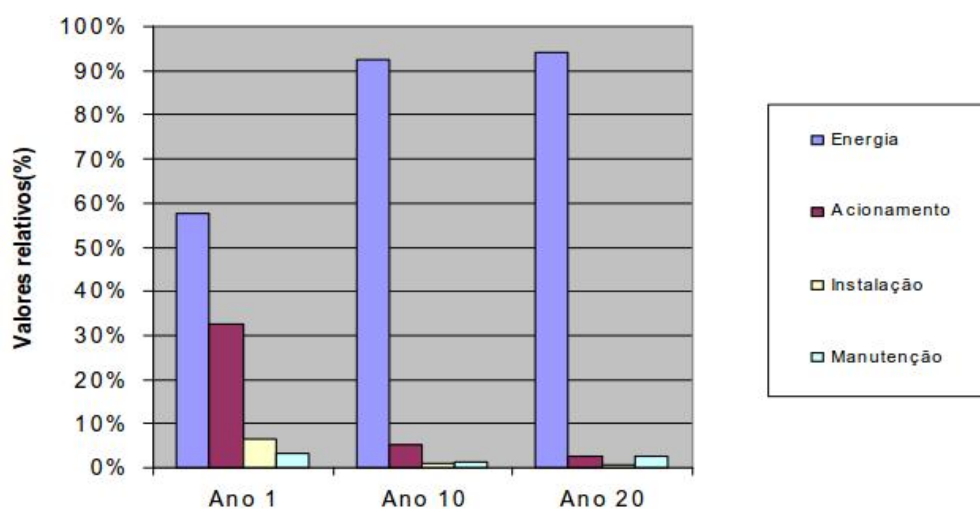


Figura 5.8: Cálculo dos custos de energia durante 20 anos.

CAPÍTULO 06

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eletrificação de sistemas de preparo e extração visa potencializar os níveis de eficiência em acionamentos, reduzindo o consumo de energia e aumentando a capacidade de geração de bioeletricidade para exportação. Com isto, melhoram-se os níveis de lucratividade das usinas e a competitividade dos demais produtos fabricados dentro delas. Esta energia renovável excedente é exportada para o SIN, aumentando a participação das renováveis e diversificando a matriz elétrica Nacional.

A biomassa da cana-de-açúcar apresenta um conjunto de características que justificam a sua aplicação como fonte de geração de energia elétrica limpa e renovável, com externalidades positivas tanto em níveis ambientais, quanto em níveis sociais. Dentre estes destacam a redução de emissões de gases de efeito estufa e a criação de renda e emprego.

Como apresentado nos capítulos deste trabalho, as maiores usinas exportadoras de eletricidade estão localizadas no estado de São Paulo, maior centro demográfico e econômico do Brasil, ou seja, é energia limpa e renovável gerada perto dos principais centros de consumo, representando menores investimentos com sistemas de transmissão e as perdas devido às quedas de tensão por longas distâncias de condutores. Destacam-se também como grandes vantagens a complementaridade da bioeletricidade da cana com a hidroeletricidade, pois o período de safra corresponde com o período de seca nos reservatórios e a possibilidade de suprimento das intermitências características em outras fontes renováveis como solar e eólica, visto que a bioeletricidade da cana é sazonal, porém não intermitente.

Não existem dados concretos sobre o percentual de usinas operando com sistemas de extração e preparo eletrificados, porém o potencial para exploração é amplo, visto que muitas usinas são antigas e não possuem equipamentos mais eficientes e de alto rendimento. Com isto, ainda não é possível estimar o quanto de energia seria possível injetar no sistema, se todas as usinas do Brasil estivessem eletrificadas.

Os desafios a serem enfrentados são amplos e passam pela superação do período de recessão que o país atravessa a redução dos níveis de endividamento das usinas para potencializar investimentos e a criação de condições e incentivos que façam com que a bioeletricidade da cana compita em pé de igualdade com as demais fontes.

De acordo com SANTOS 2012, a cultura da usina denominada sucroalcooleira tem como produto principal o açúcar e o etanol. O maior desafio é o rompimento desta cultura para que este mercado interprete que a bioeletricidade também deve ser um dos principais produtos, dado o grande potencial de cogeração e autossuficiência energética da qual estas usinas são dotadas.

O presente trabalho abordou os conceitos de eficiência e aplicação de equipamentos pertinentes aos projetos de eletrificação bem como seus respectivos ganhos e vantagens. O estudo de caso apresentou o projeto de eletrificação parcial, onde foi somente eletrificado o primeiro de seis ternos de moenda da planta e mesmo assim, os resultados obtidos foram satisfatório e o próximo terno será eletrificado já na próxima entre safra, pois para projetos de eletrificação completos de sistemas de preparo e extração (Picadores, Desfibradores e Moendas), os resultados são bem melhores e mais representativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HUGOT, E.: MANUAL DA ENGENHARIA AÇUCAREIRA. Vol 1, Ed Mestre Jou, 1977, São Paulo.

SANTOS, F. A.: Análise da Aplicação da Biomassa da Cana como fonte de Energia Elétrica: Usina de Açúcar, Etanol e Bioeletricidade, 2012. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

NOVACANA – Aspectos do Plantio da cana. Disponível em <https://www.novacana.com/cana/aspectos-plantio-cana-de-acucar/> (Acessado no dia 30/06/2017, as 20:21).

SISTEMAS DE EXTRAÇÃO DO CALDO, MOENDA E DIFUSOR, DEDINI S/A, Piracicaba, 2011.

UNICA - Relatório final da safra 2015/2016. Disponível em www.unica.com.br (acesso em 15/06/2017 as 19:00).

UNICA - Boletim: A Bioeletricidade da Cana em Números – Junho de 2017. Disponível em www.unica.com.br (acesso em 16/06/2017 as 23:00).

EPE – Plano Decenal de Expansão de Energia, Relatório Final PDE 2024. Disponível em www.epe.gov.br/ (acesso em 16/06/2017 as 21:00).

EPE – Balanço Energético Nacional, Relatório Síntese 2016, ano base 2015. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/> (acesso em 16/06/2017 as 23:00).

SHLYAKHIN, P., Steam Turbines – Theory and Design. Moscow, 1994.

NOVACANA – Vantagens da Bioeletricidade do Bagaço da cana no Brasil. Disponível em <https://www.novacana.com/estudos/vantagens-da-bioeletricidade-do-bagaco-de-cana-para-o-brasil-120913/> (acesso no dia 27/06/2017 as 19:00).

INEE – Fórum de Cogeração. Disponível em www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp (Acesso em dia 03/07/2017, as 22:15).

UNICA – Histórico de Produção e Moagem. Disponível em www.unicadata.com.br/ (acesso em 08/07/2017, as 01:02).

UNICA – Lista de unidades produtoras de Bioeletricidade – Selo Energia Verde. Disponível em <http://unica.com.br/selo-energia-verde> (acesso em 10/07/2017, as 19:22).

SOARES, L. C. S. R. Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

LORA, E. E. S., **NASCIMENTO**, M. A. R., Geração Termelétrica – Planejamento, Projeto e Operação, Ed. Interciência, Vols. 1 e 2, Rio de Janeiro, 2004.

ELETRIFICAÇÃO DE MOENDAS, Apostila de Aplicação de equipamentos do SINAMICS LOW VOLTAGE ENGINEERING MANUAL, Sinamics Drives, Siemens AG, 2015.

ABC OF DRIVES, Converters for Three-Phase AC and DC Drives, Siemens AG, 2010.

SIEMENS, Eletrificação de Moendas; disponível em http://www.siemens.com.br/medias/FILES/5295_20081103130142.pdf (Acesso em 05.07.2017 as 23:17).

PISTORE, T. T. – Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Eletrificação das Moendas na Indústria Sucroalcooleira, Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2004.

WorkShop USINA DO FUTURO, Palestrante Carlos Tambellini, Ribeirão Preto-SP, 2012.

PROCEL - Novas Tecnologias para Processos Industriais, Eficiência Energética na Indústria. Disponível em www.procelinfo.com.br (acesso em 28/06/2017 as 21:00).

PROCEL – Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria, Relatório Setorial. Disponível em www.procelinfo.com.br (acesso em 28/06/2017 as 22:00).

SOUZA, R. D. - Distorções Harmônicas, Causas e Medidas Mitigadoras, 2013. Monografia apresentada ao programa de educação continuada – PECE POLI da escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," June 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5383-1: Máquinas Elétricas Girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos, 2006.

PROCEL, Guia Técnico, MOTOR DE ALTO RENDIMENTO. Disponível em www.procelinfo.com.br (acesso em 27/06/2017 as 01:00).

CLETO, A, C, C.; Motores elétricos de alto rendimento, Porto, 2012. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores - Universidade do Porto, Portugal, 2012.

LOBOSCO, O. S.: SELEÇÃO E APLICAÇÃO DE MOTORES. Ed. McGraw-Hill, 1979.

ROBICON Perfect Harmony Medium-Voltage Air-Cooled Drives Catalog D 15.6 • 2012 | Brazil Edition.

GOLDEMBERG, J.: DONDERO, J. D. Energia Meio ambiente & Desenvolvimento. 2.ed. São Paulo: Edusp, 2003.

COELHO, S.T.; GOLDEMBERG, J.; O. & GUARDABASSI, P.M. Brazilian sugarcane ethanol: Lessons learned. In: STAP Workshop on Liquid Biofuels., 2005,. Delhi.

COELHO, S.T.; Mecanismos para Implementação da Cogeração de Eletricidade a partir da Biomassa - um modelo para o Estado de São Paulo. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/156320/1/2016AA50.pdf>
(acesso no dia 29/06/2017 as 20:00).

<http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n3/v15n3a03.pdf> Acesso no dia 30/06/2017, as 20:54).

http://www.usinasaofernando.com.br/conteudo_site.asp?tipoID=3 (Acesso no dia 30/06/2017, as 21:29).

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1874954/mod_resource/content/1/apostila%20a%C3%A7ucar.pdf (Acesso no dia 01/07/2017, as 23:11).

<http://www.canaonline.com.br/conteudo/trinta-anos-de-bioeletricidade-no-brasil-e-o-potencial-de-exportacao.html#.WXgFCoTyvIU> (Acesso no dia 24/07/2017, as 23:02).