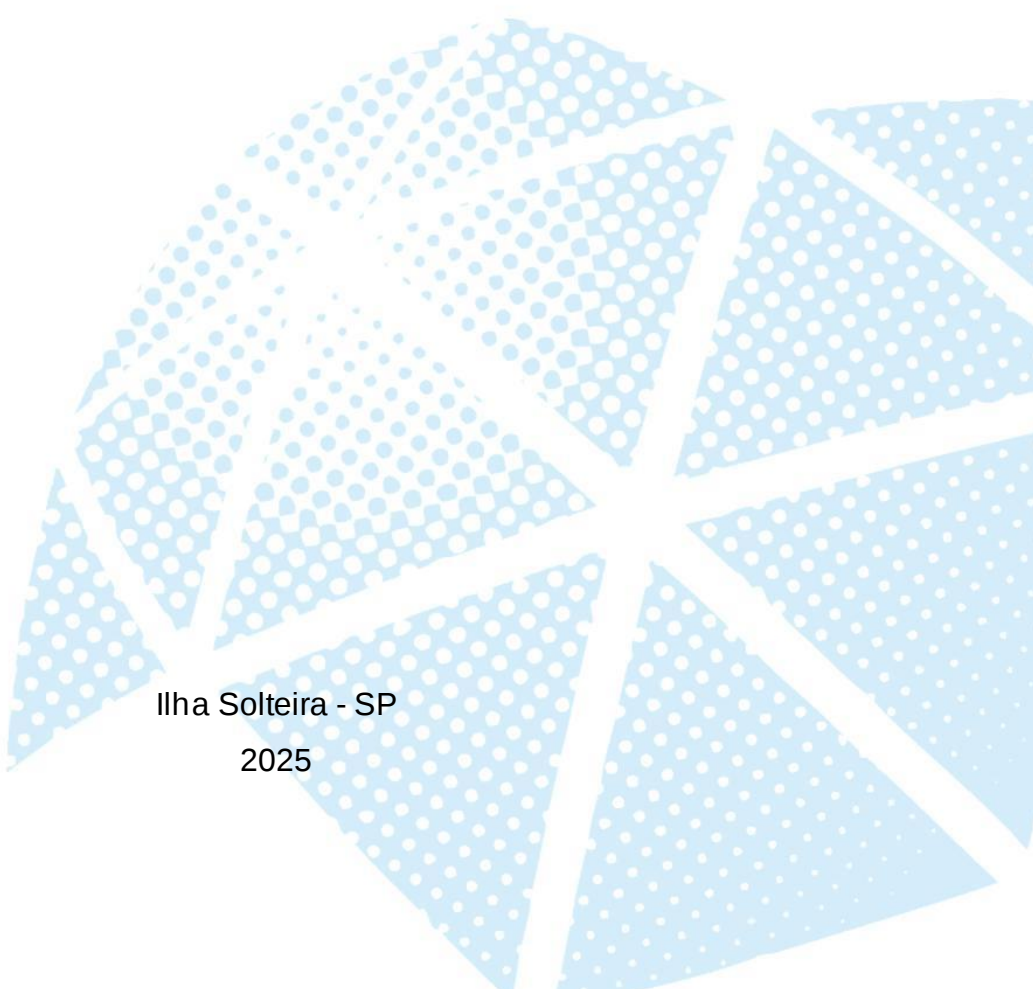


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JOSÉ EUSTÁQUIO MOREIRA JÚNIOR

**DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE COGERAÇÃO A PARTIR DO BAGAÇO DA
CANA-DE-AÇÚCAR**



Ilha Solteira - SP
2025

JOSÉ EUSTÁQUIO MOREIRA JÚNIOR

**DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE COGERAÇÃO A PARTIR DO BAGAÇO DA
CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de graduação apresentada à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: geração de energia

Orientador: Prof. Dr. Jean Marcos de
Souza Ribeiro

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M838d Moreira Júnior, José Eustáquio.
Descrição do processo de cogeração a partir do bagaço da cana-de-açúcar /
José Eustáquio Moreira Júnior. – Ilha Solteira: [s.n.], 2025
99 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro

Inclui bibliografia

1. Cogeração. 2. Cana-de-açúcar. 3. Máquinas elétricas. 4. Motores de
indução. 5. Geradores síncronos.

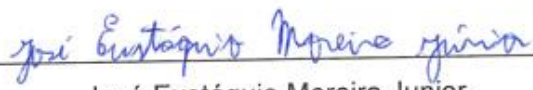
Sandra Montibeller - CRB-8/060

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dez dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **José Eustáquio Moreira Junior**, matriculado sob o nº 182053911, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro*, o *Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo* e o *Doutorando Rafael José Ginuino da Silva*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Descrição do processo de cogeração a partir do bagaço da cana-de-açúcar**", obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito aprovado.



Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- orientador -



José Eustáquio Moreira Junior
- discente -



Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo
- Membro da Banca -



Doutorando Rafael José Ginuino da Silva
- Membro da Banca -

*Dedico este trabalho aos meus pais, José e Maria, pelas grandes pessoas que
foram em vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus por ter me inspirado em cada ação, por ter me sustentado todo este tempo e por ter colocado no curso de minha história, as pessoas certas, que embora não tenham seus nomes aqui por meu zelo, espero agradece-las pessoalmente.

Primeiramente, agradeço a todos os meus familiares pelo apoio. Em especial, ao meu irmão e meus pais (*in memoriam*).

Agradeço a minha afilhada por dividir a paixão pela elétrica e por me indicar Ilha Solteira.

Obrigado também a todos os habitantes locais, que me acolheram e com quem pude ter um bom convívio.

Agradeço aos colegas e amigos da Moradia Estudantil que proporcionaram um ambiente diverso e acolhedor.

Gratidão aos colegas e amigos de fé que encontrei no Grupo de Oração Universitário Ângelus.

Obrigado também a todos os colegas de turma, todos aqueles com que tive a oportunidade de estudar, dividir a bancada e compartilhar as notas.

Agradeço a todos os funcionários da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira por sua dedicação em apoiar a educação. Meu obrigado a todos os meus professores que me ensinaram tudo quanto possível.

Obrigado também a todas as pessoas que conheci no período de estágio e que contribuíram muito para minha formação profissional e pessoal.

Agradeço ao meu orientador, professor Jean, por me corrigir e me colocar no rumo certo.

Por fim, agradeço a todos que não se reconheceram nessas palavras, mas que certamente me ajudaram e apoiaram muito.

“Quem pode contar os grãos de areia do mar, as gotas de chuva, os dias do tempo? Quem pode medir a altura do céu, a extensão da terra, a profundidade do abismo?” Livro do Eclesiástico, 1:2.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a análise, por meio de pesquisa bibliográfica, a cogeração a partir da biomassa de cana-de-açúcar bem como a apresentação do papel das máquinas elétricas neste processo. Primeiramente aborda-se os aspectos históricos do setor sucroalcooleiro, mostrando a trajetória da cana-de-açúcar no Brasil e os diversos usos da geração combinada de energia, e seus impactos ambientais comparados a outras fontes energéticas. Em seguida descreve-se brevemente as principais cargas mecânicas no processo de preparo e extração, bem como uma revisão teórica dos motores de indução trifásicos e sua relevância para o processo de cogeração. Por fim descreve-se os principais equipamentos utilizados na geração de vapor e energia elétrica, com foco na teoria de geradores síncronos, como sua operação em paralelo com um sistema de potência para a exportação da energia excedente.

Palavras-chave: Cogeração; Cana-de-açúcar; Máquinas elétricas; Motores de indução; Geradores síncronos.

ABSTRACT

This work aims to analyze, through bibliographic research, cogeneration from sugarcane biomass, as well as to present the role of electrical machines in this process. First, it addresses the historical aspects of the sugar and ethanol sector, showing the trajectory of sugarcane in Brazil and the various uses of combined energy generation, and its environmental impacts compared to other energy sources. Next, it briefly describes the main mechanical loads in the preparation and extraction process, as well as a theoretical review of three-phase induction motors and their relevance to the cogeneration process. Finally, it describes the main equipment used in the generation of steam and electricity, focusing on the theory of synchronous generators, such as their operation in parallel with a power system for the export of surplus energy.

Keywords: Cogeneration; Sugarcane; Electrical machines; Induction motor; Synchronous generator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caules de cana-de-açúcar	20
Figura 2 – Fluxograma básico de uma usina de açúcar e álcool.....	22
Figura 3 – Sequência de conversão de energia em uma usina termoeletrica.....	26
Figura 4 – Circuito térmico de baixa eficiência em uma usina sucroalcooleira	27
Figura 5– Circuito térmico de alta eficiência em uma usina sucroalcooleira	28
Figura 6 – Esquema básico do <i>ciclo Rankine</i>	28
Figura 7 – Facas rotativas de um <i>picador</i> de cana-de-açúcar.....	32
Figura 8 – Eixo de um <i>desfibrador</i> com martelos rotativos.....	33
Figura 9 – Corte lateral de um <i>desfibrador</i>	34
Figura 10 – <i>Terno de moenda</i> de cana-de-açúcar.....	34
Figura 11 – Corte lateral dos rolos metálicos de uma moenda de cana-de-açúcar ..	35
Figura 12 – Corte longitudinal de um motor de indução trifásico.....	36
Figura 13 – Estator de um motor de indução	37
Figura 14 – <i>Rotores bobinados</i> de motores de indução trifásicos.....	38
Figura 15 – Desenho esquemático (a) e modelo real (b) de um rotor do tipo <i>gaiola de esquilo</i>	38
Figura 16 – Vista frontal de uma máquina com enrolamento concentrado (a) e FMM no entreferro (b)	39
Figura 17 – Vista frontal de uma máquina trifásica com <i>enrolamentos distribuídos</i> (a) e a distribuição espacial de FMM (b)	40
Figura 18 – Análise gráfica do campo magnético girante	43
Figura 19 – Corte de rotor de um MIT sob ação do campo B_s	46
Figura 20 – Circuito equivalente do transformador aplicado ao MIT	48
Figura 21 – Circuito equivalente por fase de um MIT, com grandezas do rotor referidas ao estator	51
Figura 22 – Diagrama de fluxo de potência de um MIT	52
Figura 23 – Circuito equivalente de <i>Thevenin</i> por fase de um MIT	55
Figura 24 – Curva de torque <i>versus</i> velocidade de um típico MIT	56
Figura 25 – Diagrama típico de partida direta de um MIT	58
Figura 26 – Tiristores em anti-paralelo e forma de onda de tensão na saída de um <i>soft-starter</i>	59

Figura 27 – Formas de onda de tensão na saída de um inversor de frequência com 120 V e 60 Hz (a) e 60 V e 30 Hz (b)	60
Figura 28 – Curvas de torque <i>versus</i> velocidade de um MIT para diferentes frequências.....	61
Figura 29 – Motores de indução trifásicos empregados no processo de preparo	62
Figura 30 – Motores de indução trifásicos empregados no processo de extração	63
Figura 31 – Diagrama simplificado de uma caldeira <i>flamotubular</i>	67
Figura 32 – Diagrama simplificado de uma caldeira <i>aquatubular</i>	68
Figura 33 – Turbina a vapor <i>multi-estágios</i> com rotor exposto	71
Figura 34 – Estator de um gerador síncrono.....	72
Figura 35 – Ilustração (a) e modelo real (b) de um rotor de <i>polos salientes</i>	73
Figura 36 – Rotor de <i>polos não-salientes</i>	73
Figura 37 – Gerador síncrono com sistema de excitação sem escovas	74
Figura 38 – Bobina de um estator (a) sob a ação de um campo magnético do rotor em um gerador síncrono monofásico (b).....	75
Figura 39 – Vista frontal simplificada de um gerador síncrono trifásico de dois polos e enrolamentos concentrados	77
Figura 40 – Vista frontal simplificada de um gerador síncrono trifásico sem carga (a), com carga indutiva (b), com campo B_S (c) e campo B_R (d)	79
Figura 41 – Circuito equivalente de um gerador síncrono trifásico	80
Figura 42 – <i>Diagrama fasorial</i> de um gerador síncrono com carga resistiva	81
Figura 43 – <i>Diagrama fasorial</i> de um gerador síncrono com carga indutiva (a) e com carga capacitiva (b)	81
Figura 44 – <i>Diagrama fasorial</i> de um gerador síncrono desprezando a resistência de armadura	82
Figura 45 – <i>Diagramas fasoriais</i> mostrando o efeito do incremento de carga indutiva (a), puramente resistiva (b) e capacitiva (c), sobre a tensão V_ϕ	84
Figura 46 – Frequência <i>versus</i> potência de dois geradores em paralelo com suas respectivas contribuições à demanda de carga.....	87
Figura 47 – P <i>versus</i> f para um incremento da referência de velocidade de G_1 (a) e Q <i>versus</i> V_T para uma elevação de I_f em G_2 (b)	87
Figura 48 – Potência ativa <i>versus</i> frequência de um gerador, instantes após ser ligado à rede, fornecendo (a) e consumindo potência ativa (b)	89

Figura 49 – Efeito do aumento do incremento do ajuste do regulador de velocidade na potência ativa (a) e <i>diagrama fasorial</i> (b).....	89
Figura 50 – <i>Diagramas fasoriais</i> de tensões (a) e de potências (b).....	91
Figura 51 – <i>Curva de capacidade</i> de um gerador síncrono.....	92
Figura 52 – <i>Curvas V</i> típicas de um gerador síncrono	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Emissão de poluentes e particulados em cogeração a partir de diversos combustíveis e tecnologias	30
Tabela 2 – Especificações de uma moenda.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Corrente alternada
C	Controle de gases tipo <i>ciclone</i>
CC	Corrente contínua
cv	Cavalo-vapor
DLN	Dry Low NO _x
ESP	Eletrostatic Precipitator
FGD	Flue Gas Desulfurization
FMM	<i>Força magnetomotriz</i>
GS	Gas Scrubber
LNB	Low Emission Burner
MIT	Motor de Indução Trifásico
ONS	Operador Nacional do Sistema
PM	Particulate Matter
PROALCOOL	Programa Nacional do Alcool
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PURPA	Public Utilities Regulatory Policy Act
PWM	Pulse Width Modulation
RMS	Root Mean Square
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SCR	Silicon Controlled Rectifier
SI	Sistema Internacional
SIN	Sistema Interligado Nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Densidade de campo magnético (vetor)
<i>B</i>	Densidade de campo magnético (escalar)
E	Tensão interna (<i>fasor</i>)
<i>E</i>	Tensão interna (escalar)
<i>e_{ind}</i>	Tensão induzida
<i>F</i>	Força
<i>f</i>	Frequência
H	Intensidade de campo magnético (vetor)
I	Corrente elétrica (<i>fasor</i>)
<i>I</i>	Corrente elétrica (módulo)
<i>i</i>	Corrente elétrica (contínua ou variável)
<i>L</i>	Indutância
<i>l</i>	Comprimento
<i>N</i>	Número de espiras
<i>n</i>	Velocidade angular (<i>rpm</i>)
<i>P</i>	Potência ativa
<i>p</i>	Número de polos
<i>Q</i>	Potência reativa
<i>QV</i>	Queda de velocidade
<i>R</i>	Resistência elétrica
<i>r</i>	raio
<i>RT</i>	Regulação de tensão
<i>S</i>	Potência aparente
<i>s</i>	Escorregamento
<i>t</i>	Tempo
V	Tensão elétrica terminal (<i>fasor</i>)
<i>V</i>	Tensão elétrica terminal (módulo)
<i>v</i>	Velocidade linear
<i>X</i>	Reatância
<i>Y</i>	Ligação entre bobinas
<i>Z</i>	Impedância

α	Ângulo medido a partir de B máximo
Δ	Ligação entre bobinas
δ	Ângulo de torque
η	Eficiência
θ	Ângulo entre tensão terminal e corrente de armadura
θ_e	Ângulo elétrico
θ_m	Ângulo mecânico
ϕ	Fluxo magnético
ω	Velocidade angular (rad/s)
F	<i>Força magnetomotriz</i>
T	Torque

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	HISTÓRICO E ASPECTOS DAS USINAS SUCROALCOOLEIRAS E DA COGERAÇÃO	19
2.1	HISTÓRICO E ASPECTOS DAS USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	19
2.1.1	Dos engenhos às indústrias sucroenergéticas	19
2.1.2	Descrição de uma usina sucroenergética.....	22
2.2	HISTÓRICO E ASPECTOS DA COGERAÇÃO.....	23
2.2.1	Definição, vantagens e histórico da cogeração de energia	24
2.2.2	Aspectos gerais da cogeração de energia e aplicação no setor sucroalcooleiro.....	25
2.3	COGERAÇÃO E MEIO AMBIENTE	29
3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE PREPARO E MOAGEM.....	32
3.1	CARGAS MECÂNICAS.....	32
3.2	MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	36
3.2.1	Características construtivas dos motores de indução trifásicos	36
3.2.2	Enrolamentos concentrados e distribuídos	39
3.2.3	Ondas girantes de FMM	41
3.2.4	Princípios do funcionamento do MIT	45
3.2.5	Escorregamento do MIT	47
3.2.6	Circuito equivalente do MIT	48
3.2.7	Análise do circuito equivalente	51
3.2.8	Curva característica de torque <i>versus</i> velocidade do MIT	54
3.2.9	Métodos de partida de MITs aplicados ao processo de preparo e extração.....	57
3.2.9.1	Métodos de partida de MITs.....	57
3.2.9.2	Uso dos inversores de frequência nos equipamentos de preparo e extração.....	61
3.2.10	Ganhos no uso de MITs no processo de preparo e extração.....	64
3.2.10.1	Escolha do MIT em função dos parâmetros da carga	64
3.2.10.2	Eficiência de um sistema de acionamento elétrico de uma moenda	65

4	GERAÇÃO DE VAPOR E ENERGIA ELÉTRICA.....	67
4.1	CALDEIRAS.....	67
4.2	TURBINAS A VAPOR.....	69
4.3	GERADORES SÍNCRONOS	71
4.3.1	Características construtivas dos geradores síncronos.....	71
4.3.2	Tensão induzida no estator por uma espira girante	75
4.3.3	Circuito equivalente de um gerador síncrono	78
4.3.4	Torque e potência em geradores síncronos	82
4.3.5	Gerador operando isolado	83
4.3.6	Gerador operando em paralelo	85
4.3.6.1	Paralelismo entre geradores síncronos.....	86
4.3.6.2	Geradores síncronos em paralelo com um <i>barramento infinito</i>	88
4.3.7	Curva de capacidade e curvas V	90
5	CONCLUSÃO.....	94
	REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a crescente demanda por energia elétrica, impulsiona a procura novas fontes para sua produção que devem atender a critérios ambientais restritivos. Uma fonte pouco comentada é a geração de energia elétrica a partir da biomassa, que segundo dados do Operador Nacional do Sistema, ONS (2025), correspondeu a 6,4% da capacidade instalada no país em setembro de 2025.

Entende-se por biomassa o refugo de matéria orgânica de algum processo industrial ou agrícola. O Brasil, que por possuir uma extensa área de terras cultiváveis, tem na agricultura um dos principais setores da economia. A atividade de cultivo nas lavouras e o processamento de matéria-prima nas indústrias gera muitos resíduos (palha, casca, bagaço, fibras, etc) que podem servir de combustível para alimentar caldeiras, gerar vapor e energia elétrica (ONS, *apud* CARDOSO, 2011). Neste cenário, se destaca a cana-de-açúcar, que está presente no país desde tempos coloniais. Em 2023, das 637 unidades geradoras que utilizam biomassa instaladas no território nacional, 422 estão instaladas no pátio de indústrias sucroalcooleiras, somando 12410 MW de capacidade instalada (JORNAL CANA, 2025). Em termos percentuais, a biomassa da cana-de-açúcar representou 4,9% da oferta de energia elétrica em 2024 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2025) no país.

O uso da biomassa como combustível é chamado de cogeração e dá origem a mais de uma forma de energia (QUEIROZ, 2008). A queima da matéria orgânica em caldeiras permite a obtenção de vapor de alta pressão. Este vapor é destinado para turbinas a vapor acopladas a geradores síncronos. A energia elétrica produzida alimenta o processo produtivo sendo o excedente injetado no SIN (Sistema Interligado Nacional). O vapor que passa pelas turbinas dos geradores ainda é reaproveitado no processo produtivo como fonte de calor e força motriz.

Atualmente, o uso do vapor como força mecânica para movimentar mecanismos (ternos da moenda, desfibrador, bombas centrífugas etc.) é pequeno sendo a maior parte das máquinas movidas por motores de indução trifásicos. Isso acarreta a diminuição no uso do vapor, sendo o excedente mais bem aproveitado nos turbogeradores com consequente aumento de geração de energia elétrica (CHICOA, 2017).

Assim, estudar o processo de cogeração de energia elétrica proveniente da biomassa da cana-de-açúcar é de suma importância. Essa energia limpa injetada no

SEP (Sistema Elétrico de Potência) representa uma parcela importante na matriz energética do Brasil e mais um ativo para geração de receita no setor sucroalcooleiro.

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em uma introdução e quatro capítulos de desenvolvimento, culminando na conclusão. Inicialmente, o foco está em contextualizar a cogeração de energia em usinas sucroalcooleiras, apresentando as motivações para este estudo e os objetivos propostos. A partir desse ponto, o segundo capítulo se dedica a descrever a evolução das indústrias de açúcar e álcool, expondo a estrutura básica de uma usina e discutindo a questão ambiental do setor.

Em seguida, no terceiro capítulo, aprofunda-se a análise nos aspectos qualitativos das cargas mecânicas presentes no processo de preparo e extração da cana-de-açúcar. Também são explicados os princípios de funcionamento dos motores de indução trifásicos, sua aplicação, as dificuldades e os ganhos esperados. O quarto capítulo, por sua vez, descreve os princípios da geração de vapor e seu uso na geração de energia elétrica, abordando o funcionamento de máquinas térmicas (caldeiras e turbinas a vapor) e máquinas elétricas síncronas.

Para finalizar, a conclusão do trabalho, salienta a importância do tema tratado, apresenta as lições aprendidas além de sugerir novas abordagens para pesquisas futuras.

2 HISTÓRICO E ASPECTOS DAS USINAS SUCROALCOOLEIRAS E DA COGERAÇÃO

Este capítulo apresenta um breve histórico das indústrias de açúcar e álcool, desde suas origens até o cenário atual. Em seguida, descreve-se a arquitetura geral de uma usina sucroalcooleira e como ela se beneficia do processo de cogeração de energia.

2.1 HISTÓRICO E ASPECTOS DAS USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

Nesta seção é mostrado um breve histórico das usinas de açúcar e álcool e como evoluíram a partir dos antigos engenhos até os dias atuais. Também é feita uma descrição geral de uma planta de uma usina sucroalcooleira e seu funcionamento básico.

2.1.1 Dos engenhos às indústrias sucroenergéticas

Presente desde o período colonial no Brasil, a cana-de-açúcar, planta de caule fino e fibroso, como pode ser visto na Figura 1, sempre foi fonte de riqueza para o país. Os portugueses encontraram condições propícias para o cultivo da *saccharum officinarum* principalmente nas regiões litorâneas das capitanias de Pernambuco, Bahia e Rio de Janeiro (SOUZA, 2024).

Durante muito tempo, os engenhos para produção de açúcar foram a principal atividade econômica da colônia portuguesa. Utilizando processos considerados arcaicos para os dias atuais, além do emprego de mão-de-obra escrava, os engenhos pouco evoluíram entre os séculos XVI e XIX. Em Cuba, entre os anos de 1790 e 1830, foram introduzidos processos mecanizados, possibilitando um aumento considerável na produção de açúcar alcançando a marca de 1 milhão de toneladas anuais. Tal processo também ocorreu na ilha de Java. Com isso o açúcar produzido no Brasil perdeu competitividade no mercado internacional e, somando os efeitos da abolição da mão de obra escrava, tornou clara a necessidade de melhorar o processo produtivo (RODRIGUES; ROSS, 2020).

Figura 1 – Caules de cana-de-açúcar



Fonte: (SANTOS, 2013).

O primeiro passo foi dado em 1875 com a adoção do sistema de engenhos centrais (Decreto Legislativo nº 2687) que processavam a cana-de-açúcar passando a adotar máquinas a vapor importadas (usadas e reformadas) em substituição à tração animal e empregando obrigatoriamente mão-de-obra livre. Os pequenos engenhos passaram então a se dedicar mais ao cultivo e fornecimento da matéria-prima. Com o passar do tempo, apesar de manter a mesma denominação, os engenhos centrais começaram a se parecer mais com as atuais usinas na última década do século XIX. Isso ocorreu principalmente devido à dificuldade de entrega da cana-de-açúcar por parte dos antigos engenhos, técnicas de cultivo ineficiente que ocasionavam ociosidade das máquinas e trabalhadores. Como consequência, a cana-de-açúcar começou a ser cultivada pelas próprias usinas que se instalavam próximo a ferrovias e rios para facilitar a entrega da matéria-prima e escoamento da produção. Os rios também possibilitavam uso da água para processos produtivos como lavagem, geração de vapor (calor e força motriz) e em alguns casos, como do Engenho Central

de Piracicaba, a geração de energia elétrica por meio de geradores hidráulicos (RODRIGUES; ROSS, 2020).

A maior parte da produção das usinas era de açúcar sendo o álcool e a aguardente produzidos em menor escala. O álcool etílico começou a ser mais bem visto como forma de lucro por parte das usinas, com a criação do PROALCOOL (Programa Nacional do Alcool) em 1975. Este programa governamental foi uma resposta à crise energética devido ao aumento do preço do petróleo no mercado internacional, já que 80% dos derivados de petróleo eram importados. O intuito do PROALCOOL era incentivar, o uso do álcool hidratado como combustível propriamente dito e do álcool anidro para ser acrescentado à gasolina empregada em automóveis. Isto foi possível devido aos incentivos do governo federal, que garantia a compra do álcool produzido bem como a equidade de preço com o açúcar, que na época, estava com preços baixos para exportação. Ouve grande aderência das usinas que possuíam capacidade ociosa das destilarias anexas às fábricas de açúcar (RODRIGUES; ROSS 2020).

Já na última década do século passado, a criação da lei nº 8987 de 1995, permitiu a concessão de serviços públicos à agentes privados. Mais especificamente do setor elétrico, a lei nº 9074, no mesmo ano, passa a regulamentar as concessões para geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. No começo do século XXI, a crise hídrica e o racionamento de energia elétrica demonstraram a necessidade de se expandir a matriz energética brasileira, o que culminou na criação do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) em 2004. Todo esse cenário incentivou o aumento na produção de energia elétrica nas usinas de açúcar e álcool por meio da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Assim, o excedente passou a ser negociado no livre mercado de energia, se tornando mais um produto derivado da cana-de-açúcar. Vale destacar que a biomassa já era utilizada para gerar energia elétrica, mas apenas para autoconsumo. Atualmente a biomassa da cana-de-açúcar também tem sido utilizada para a produção de etanol por meio de tecnologias denominadas de segunda geração (RODRIGUES; ROSS, 2020).

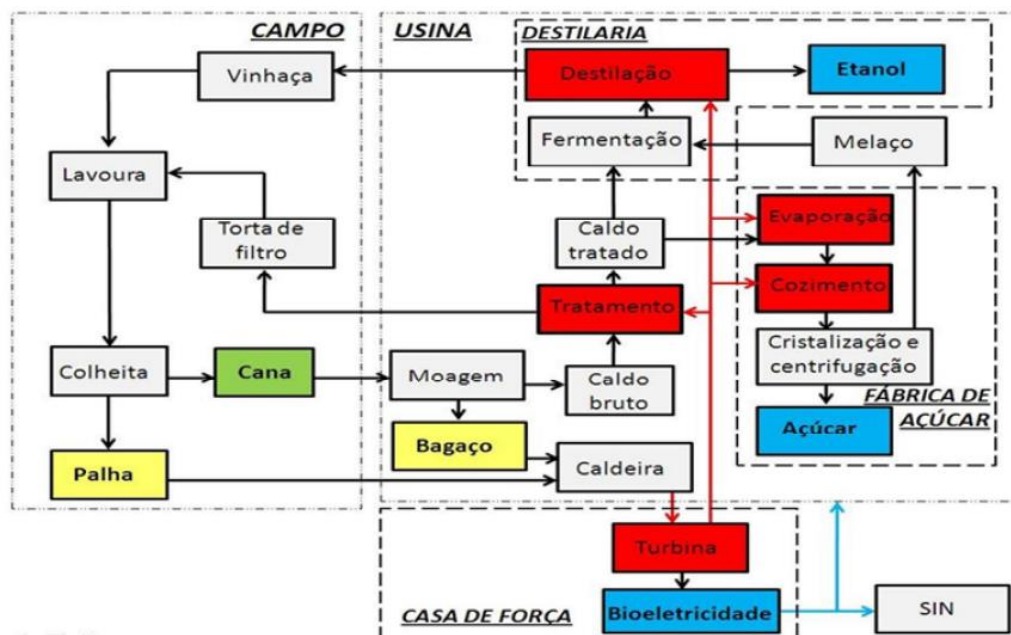
O começo do século XXI também coloca o setor sucroenergético, como é denominado atualmente devido a importância da energia, no cenário das mudanças climáticas. O maior acontecimento no setor no que se refere ao meio ambiente foi a extinção das queimadas para facilitar o corte manual, que também foi praticamente

reduzido com o advento das colheitadeiras mecanizadas (RODRIGUES; ROSS, 2020). Fechando a trajetória da cana-de-açúcar e do setor sucroenergético, mais recentemente, tem sido bastante pesquisada a viabilidade técnica e econômica do processo de reforma a vapor do etanol para produção de hidrogênio (SILVA, 2010).

2.1.2 Descrição de uma usina sucroenergética

A arquitetura de uma usina sucroalcooleira, como mostrado na Figura 2, é composta de setores: extração, caldeira (utilidades), fábrica de açúcar, destilaria e casa de força. Existem ainda setores auxiliares como tratamento de caldo, manutenção industrial e automotiva, depósitos, estação de tratamento de efluentes e administrativo. Cabe salientar que a planta industrial é dependente das atividades agrícolas que produzem a matéria-prima (CHICOA, 2017).

Figura 2 – Fluxograma básico de uma usina de açúcar e álcool



Fonte: (ÚNICA, 2011 apud SANTOS, 2012).

Primeiramente, a cana-de-açúcar colhida nas lavouras chega na unidade industrial e passa por pesagem sendo recolhidas amostras para aferir teor de sacarose. Em seguida é transportada para o setor de extração sendo inicialmente lavada nas mesas alimentadoras. Daí segue para o cortador que tem a função de

cortar a cana em pequenos colmos. A etapa seguinte é transportar a cana até o desfibrador que expõe ao máximo as fibras da *saccharum officinalis* de modo a facilitar o processo de extração do caldo rico em sacarose nos ternos da moenda. A cana segue por uma esteira que passa por cima de um eletroímã para retirada de possíveis fragmentos metálicos que possam danificar os equipamentos. Na moenda, a cana desfibrada passa entre grandes rolos metálicos chamados de ternos para extração do caldo. Após o primeiro terno, o bagaço ainda é embebido em água e passa por mais ternos até se extrair o máximo de sacarose. Desse processo, se obtém caldo e bagaço (LAZZARINI, 2012).

O caldo segue para a etapa de tratamento para a retirada de impurezas e o bagaço, ainda com umidade residual, segue para ser queimado na caldeira para geração de vapor de alta pressão e temperatura, utilizado na casa de força para acionar os turbogeradores e assim gerar energia elétrica (LAZZARINI, 2012).

O vapor de escape da turbina, acoplada ao gerador, em baixa pressão é enviado para os processos industriais que necessitam de calor como tratamento de caldo, evaporação e cozimento. O caldo proveniente do tratamento segue para o cozimento e evaporação resultando em um caldo reduzido com cristais chamado mel. Este segue para centrífugas que separam os cristais de açúcar do mel, que circula novamente no processo afim de ser centrifugado novamente até se extrair o máximo de cristais de açúcar que posteriormente é secado, embalado e estocado (LAZZARINI, 2012).

Por fim, o mel residual resultante desse processo, é enviado à destilaria sendo misturado com caldo de cana e água para se formar o mosto para fermentação. O mosto fermentado é centrifugado para separação das leveduras e enviado às colunas de destilação para se separar a água do álcool etílico que é armazenado em dornas (LAZZARINI, 2012).

2.2 HISTÓRICO E ASPECTOS DA COGERAÇÃO

Nesta seção, será apresentado um breve histórico do processo de cogeração como um método geral, não se restringindo apenas ao setor sucroenergético. Também são descritos os aspectos gerais do processo de cogeração, como a conversão de energia além de expor os ciclos termodinâmicos envolvidos.

2.2.1 Definição, vantagens e histórico da cogeração de energia

Define-se cogeração como a obtenção de mais de uma forma de energia útil a partir do mesmo combustível gerando-se energia térmica e simultaneamente energia mecânica e/ou elétrica (QUEIROZ, 2008). A cogeração, que visa atender as necessidades de calor, força motriz e eletricidade em um processo industrial, tem o intuito de aproveitar o máximo potencial energético do combustível base (CHICOA, 2017).

A cogeração é uma prática comum não somente nas indústrias de açúcar e álcool, mas também em outros setores industriais como papel e celulose, químico e petroquímico. A cogeração também costuma ser aplicada ao setor de serviços como hospitais, aeroportos, hotéis, etc. Em todos os casos, tem-se como benefícios a autonomia da rede de fornecimento, provendo ganho na segurança de fornecimento de energia e o aproveitamento de resíduos para a produção de energia destinada o próprio consumo, diminuindo os gastos com energia (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

Apesar do tema aparentar ser típico dos dias atuais nas grandes indústrias, a cogeração tem sido utilizada a bastante tempo. Já no século XIV, se empregava um sistema rudimentar chamado *smokejack* que acionava um sistema mecânico de elevação por meio da energia dos gases provenientes da queima de algum combustível (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

Na segunda metade do século XVIII, Watt e Bulton aplicaram máquinas de combustão na West Indies & Co. para se gerar potência mecânica, que acionavam moendas de cana-de-açúcar, sendo também gerada energia térmica necessária para a fabricação do açúcar. Em 1787, Oliver Evens fabricou máquinas a vapor de alta pressão que eram empregadas em destilarias, cervejarias e indústrias de papel sendo o calor dos gases de exaustão utilizado nos processos industriais que ganhavam com isso, eficiência no uso do combustível. Nas oficinas inglesas, a cogeração era empregada em processos e também em condicionamento de ambientes. Na Alemanha, o calor recuperado de motores a combustão, foi amplamente usado para aquecimento de fábricas e prédios (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

Na virada para o século XX a cogeração, que até então era utilizada para a geração de calor e potência mecânica, começou a ser empregada na geração de energia elétrica. Normalmente os sistemas eram munidos de trocadores de calor que entregavam água quente para as fábricas e residências. Com o incremento do

combustível primário e consequente aumento de temperatura, se gerava vapor destinado ao acionamento de geradores elétricos e ao processo fabril (STEPHEN, 1994 *apud* VIANA JÚNIOR, 1999).

Centrais geradoras para consumo próprio, eram comuns entre grandes e médios consumidores, chegando a representar 50% da energia elétrica gerada nos Estados Unidos. Isso acontecia pois ainda não existiam grandes centrais geradoras e um sistema elétrico que conseguisse suprir a demanda com eficiência e baixos custos. Somente depois de 1940, o número de centrais elétricas começou a aumentar, desestimulando a implementação de novos sistemas de cogeração que, no começo da década de 70, representavam apenas 3% do mercado (STEPHEN, 1994 *apud* VIANA JÚNIOR, 1999).

Em 1973 com a primeira crise do petróleo, houve grande incentivo à racionalização do uso da energia, despertando novamente o interesse na cogeração. A segunda crise do petróleo em 1978 que forçou a publicação, nos Estados Unidos, da PURPA (Public Utilities Regulatory Policy Act), que forçou o rompimento da estrutura das concessionárias públicas do setor elétrico (ROMÃO JÚNIOR, 2009), favorecendo a competição de novos geradores do setor privado, o que viria a acontecer no Brasil na última década do século XX.

Com a necessidade de se diversificar a matriz energética brasileira no começo do século XXI (RODRIGUES, 2020), as usinas de açúcar e álcool ganharam destaque por seus processos de cogeração. O setor sucroalcooleiro passou a ser visto não somente como auto suficiente em energia elétrica, mas também como potencial gerador de energia elétrica excedente para comercialização (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

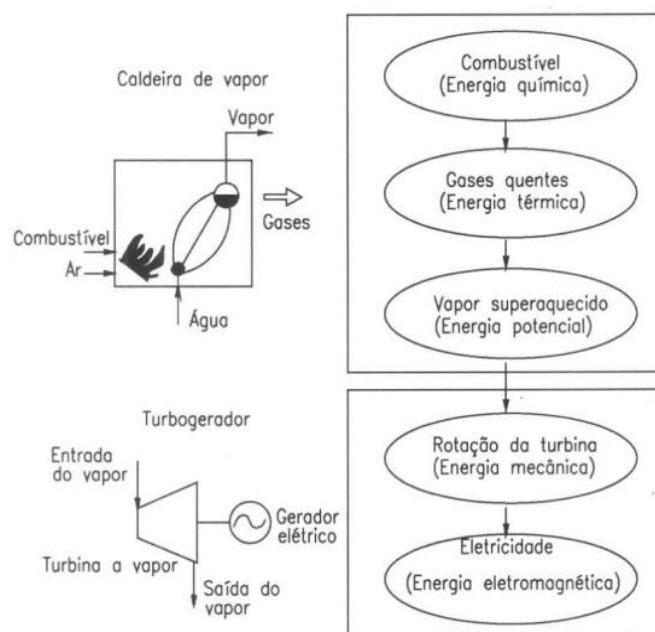
2.2.2 Aspectos gerais da cogeração de energia e aplicação no setor sucroalcooleiro

Um sistema de cogeração pode ser classificado de acordo com a sequência de geração de energia térmica e força eletromotriz. Denomina-se *bottoming*, o sistema de cogeração em que primeiro é queimado um combustível para atender uma demanda térmica, sendo o calor rejeitado pelo processo recuperado para se produzir energia elétrica ou mecânica. Este tipo de configuração é típico de indústrias químicas que exigem altas temperaturas em seus processos. Já na geração do tipo *topping*,

típica das indústrias de açúcar e álcool, o combustível é queimado com a necessidade primária de se produzir força motriz e/ou energia elétrica e o calor rejeitado é utilizado para suprir as necessidades térmicas do processo (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

Em termos de conversão de energia, a cogeração pode ser considerada uma usina termoeletrica, ou seja, converte o calor da queima de um combustível, em energia elétrica. Na Figura 3 é apresentada a sequência de conversão, desde a energia química presente no combustível, passando pela energia térmica e potencial do vapor superaquecido provenientes da caldeira, até a energia mecânica na turbina que é convertida em energia elétrica e disponibilizada nos terminais do gerador elétrico.

Figura 3 – Sequência de conversão de energia em uma usina termoeletrica

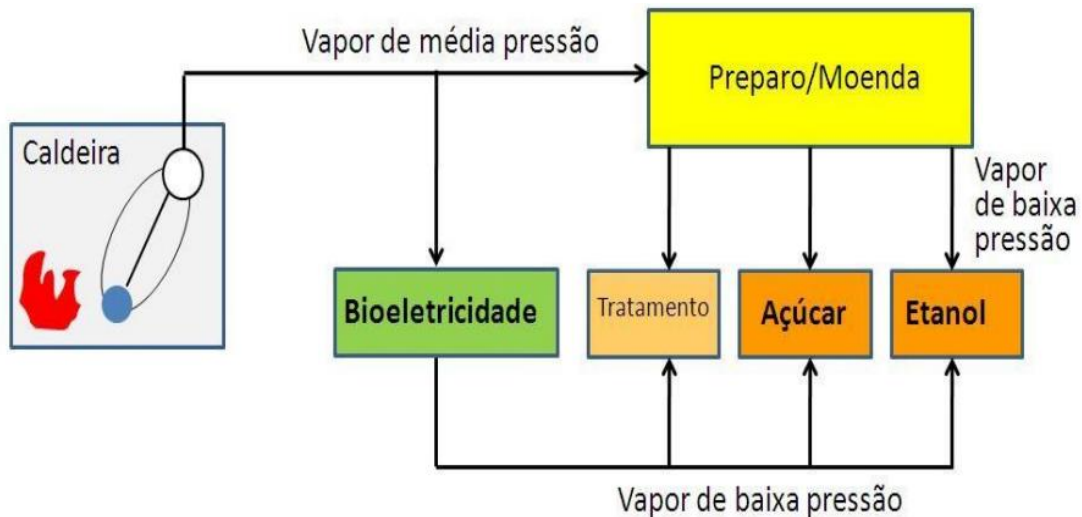


Fonte: (LORA e NASCIMENTO, 2004 *apud* SANTOS, 2012).

Do ponto de vista de eficiência energética, pode-se separar o processo de cogeração e uma indústria sucroalcooleira em dois casos. O primeiro deles, como pode ser visto na Figura 4, empregado em usinas mais antigas, utiliza caldeiras e turbinas de baixa eficiência térmica. O vapor gerado na caldeira, em torno de 21 bar de pressão, é direcionado em parte diretamente para as turbinas que acionam as cargas do processo de preparo e extração de caldo. Daí segue em baixa pressão e temperatura, para os outros processos industriais que necessitam de calor e força motriz. Parte desses processos, também são supridos por energia elétrica proveniente

de um gerador acoplado ao eixo de uma turbina que recebe o vapor da linha de média pressão proveniente da caldeira (SANTOS, 2012).

Figura 4 – Circuito térmico de baixa eficiência em uma usina sucroalcooleira

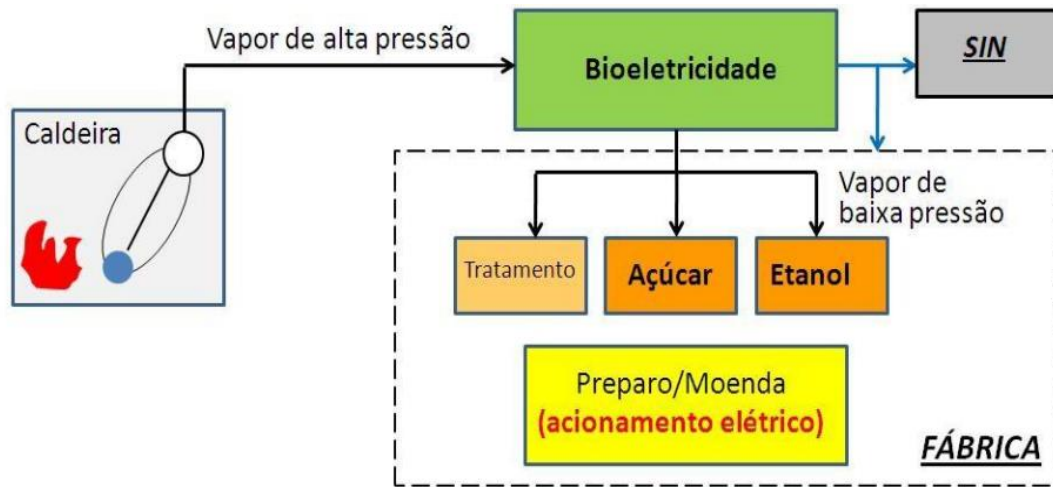


Fonte: (SANTOS, 2012).

O caso apresentado na Figura 4 permite apenas produção de energia elétrica apenas para autoconsumo. O segundo caso, mostrado na Figura 5, está presente em usinas sucroalcooleiras de concepção mais moderna e apresenta maior eficiência no uso da energia térmica da biomassa da cana-de-açúcar.

Observa-se na Figura 5, que o vapor produzido pela caldeira é de maior pressão, cerca de 65 bar, o que permite utilizar turbinas mais eficientes acopladas aos geradores, maximizando a geração de energia elétrica. O vapor da turbina é extraído em baixa pressão para os processos industriais que requerem calor. Os acionamentos mecânicos da extração (cortador, desfibrador e moendas) do caso anterior dão lugar a motores elétricos de alta eficiência. Apesar de demandarem grandes quantidades de energia elétrica, devido à alta eficiência na conversão eletromecânica, propiciam a geração de excedentes que são exportados para o SEP, tornando a energia elétrica o terceiro ativo das usinas sucroalcooleiras (SANTOS, 2012).

Figura 5– Circuito térmico de alta eficiência em uma usina sucroalcooleira

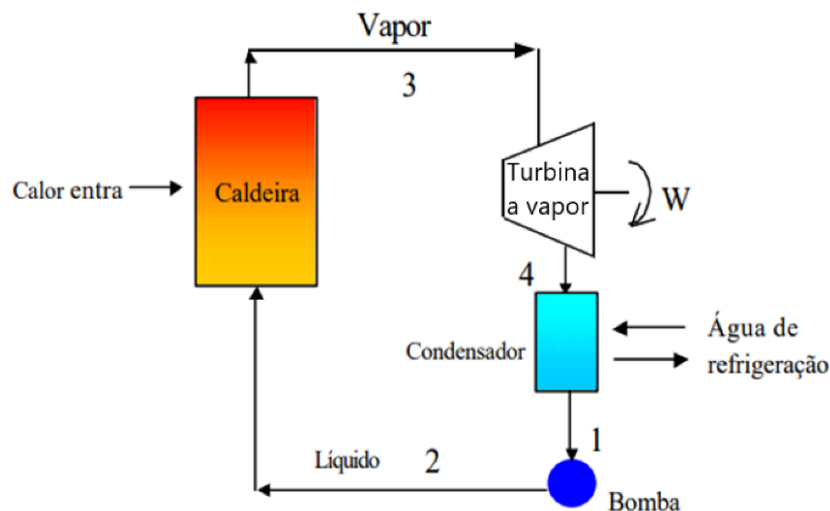


Fonte: (SANTOS, 2012).

Em termos de termodinâmica, o processo de cogeração pode utilizar variados ciclos, cada qual com suas particularidades no que se refere aos equipamentos empregados, eficiência térmica e custos. Cada aplicação se diferencia conforme o nível de investimento pretendido, tempo de implantação e retorno financeiro e tipo de combustível, se é líquido, sólido ou gás.

Para o caso das indústrias de açúcar e álcool, emprega-se o ciclo *Rankine*, ilustrado na Figura 6, que é o ciclo a vapor básico. Esse ciclo utiliza a água como fluido de trabalho, que apresenta mudança de fase durante o processo (VIANA JÚNIOR, 1999).

Figura 6 – Esquema básico do ciclo *Rankine*



Fonte: Adaptado de VIANA JÚNIOR (1999).

O combustível, neste caso a biomassa de cana-de-açúcar, entra em combustão na caldeira sendo o calor proveniente transferido para o fluído de trabalho que vaporiza. O vapor se expande na turbina, que gira acoplada a um acionamento mecânico ou gerador elétrico por exemplo. O vapor é condensado e retorna para a caldeira (VIANA JÚNIOR, 1999).

O *ciclo Rankine* tem ainda algumas outras variações que tem como intuito, aumentar sua eficiência, como por exemplo, o reaquecimento do vapor proveniente da turbina por meio de um trocador de calor adicional na caldeira. Neste caso, com o aumento de temperatura e pressão do vapor, as superfícies das caldeiras ficam expostas às altas temperaturas, constituindo-se um fator limitante para a melhora de eficiência (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

2.3 COGERAÇÃO E MEIO AMBIENTE

Praticamente todas as formas de produção de energia afetam o meio ambiente em alguma medida. Enquanto a energia solar fotovoltaica e a energia eólica têm impactos quase insignificantes, a geração nuclear tem o potencial de causar grandes impactos ambientais devido aos resíduos radioativos (PISTORE, 2004).

Assim, pode-se afirmar que a cogeração de energia ocupa uma posição intermediária, em relação às outras fontes conhecidas, na questão do impacto ambiental causado. Se o combustível utilizado for de fontes renováveis, como é o caso da biomassa da cana-de-açúcar, a cogeração nas indústrias sucroalcooleiras se destaca por contribuir para a redução das emissões líquidas de CO₂, que é absorvido pela *saccharum officinarum* durante seu desenvolvimento (PISTORE, 2004).

Apesar da geração de energia causar diversos problemas ambientais, mostra-se aqui mais a questão das emissões de poluentes para a atmosfera causadas em específico pela combustão de combustíveis em termoelétricas. Além do já citado CO₂ (dióxido de carbono), também merece atenção o CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrogênio), SO_x (óxidos de enxofre) além de PM (materiais particulados).

Óxidos de nitrogênio são gerados principalmente pela queima de gás natural em turbinas a gás devido as altas temperaturas na câmara de combustão. Esses gases não só contribuem para o efeito estufa e a chuva ácida, como também reagem na atmosfera, formando o ozônio troposférico. Para a saúde humana, os NO_x causam

sérios danos ao sistema respiratório, aumentando a suscetibilidade a infecções das vias aéreas e pulmonares. Já os óxidos de enxofre são produzidos principalmente devido a queima de óleo e carvão em termoeletricas. Na saúde humana causa doenças no aparelho respiratório (SALOMON, 2003).

Material particulado refere-se a quaisquer substâncias microscópicas, líquidas ou sólidas (exceto água pura), que flutuam na atmosfera e que são maiores que moléculas individuais (LORA, 2000 *apud* SALOMON, 2003). A emissão de material particulado com diâmetro inferior a $2,5\mu\text{m}$, representa grave ameaça a saúde humana. Se inalado, penetra profundamente nos pulmões, agravando doenças respiratórias. Já o monóxido de carbono, que resulta da combustão do carvão, é asfixiante, prejudicando a saúde celular. Por fim o dióxido de carbono, é resultante da queima completa de compostos com carbono (SALOMON, 2003).

Como visto, cada combustível contribui mais com um tipo de emissão de poluentes. Na Tabela 1, são mostrados os níveis de emissão de gases e particulados.

Tabela 1 – Emissão de poluentes e particulados em cogeração a partir de diversos combustíveis e tecnologias

Tecnologia	Combustível	Método de controle*	NO _x (g/GJ)	SO _x (g/GJ)	CO ₂ (g/GJ)	MP (g/GJ)
Combustão	Biomassa de cana-de-açúcar	Nenhum	80	0	104000	3192
		C	80	0	104000	159,6
		GS	80	0	104000	53,2
		ESP	80	0	104000	26,6
Ciclo combinado	Gás natural	Nenhum	86,06	0,29	56705,58	2,92
		SCR	3,44	0,29	56705,58	2,92
		DLN	0,49 -1,23	0,29	56705,58	2,92
Motor de combustão interna	Diesel	Nenhum	1043,70	173,92	68558,72	37,34
		SCR	41,75	173,92	68558,72	37,34
		FGD	1043,70	3,47	68558,72	37,34
		ESP	1043,70	173,92	68558,72	0,30
		SCR/ESP	41,75	173,92	68558,72	0,30
Turbina a gás	Gás natural	Nenhum	53,43	0,32	58101,55	3,17
		SCR	3,44	0,32	58101,55	3,17
		DLN	0,49 -1,23	0,32	58101,55	3,17
Turbina a vapor	Carvão	Nenhum	528,74	913,28	2113573,66	55,28
		LNB	264,37	913,28	2113573,66	55,28
		ESP	528,74	913,28	2113573,66	0,44
		FGD	528,74	18,27	2113573,66	55,28
		LNB/ESP/FGD	528,74	18,27	2113573,66	0,44

*(C) ciclone, lavador de gases (GS), ESP (precipitador eletrostático), SCR (redução seletiva catalítica), DLN (câmara de combustão seca com baixa emissão de NO_x), FGD (desulfurização dos gases de combustão), LNB (queimador com baixa emissão de NO_x).

Fonte: Adaptado de SALOMON (2003).

Verifica-se que, sem nenhum tipo de controle de emissões, o nível de emissão de particulados de combustão da biomassa de cana-de-açúcar é maior do que quando é aplicado algum tipo de controle). Também é possível observar que o uso do LNB reduz pela metade as emissões de óxidos de nitrogênio na combustão do carvão. Para o controle do NO_x o uso do SCR permite reduzir em 96% dos níveis deste poluente na queima do gás natural em ciclo combinado, comparado a situação sem nenhum método de controle. Já o DLN a redução dos óxidos de nitrogênio consegue ser ainda mais pronunciada.

Para o controle de óxidos de enxofre, observa-se que o FGD reduz em 98% os níveis de emissão deste composto na queima do carvão. Verifica-se que o ESP minimiza significativamente os níveis de materiais particulados emitidos por motores diesel. É possível verificar que nenhum método de controle consegue atuar na redução de emissão do dióxido de carbono.

Comparando os níveis de emissão dos combustíveis utilizados para geração de energia elétrica, sem métodos de controle, a primeira constatação é a maior emissão de materiais particulados com o uso da biomassa de cana-de-açúcar, em grande parte devido às cinzas provenientes de sua combustão. Já os níveis de óxidos de nitrogênio emitidos pela queima do bagaço estão na mesma faixa que os liberados na combustão do gás natural em ciclo combinado. Porém uso da *saccharum officinarum* mostra vantagem por não emitir óxidos de enxofre.

Por fim, o CO₂ liberado nas chaminés das caldeiras das usinas de açúcar e álcool, mesmo sendo aproximadamente duas vezes maior do que os liberados com o uso do gás natural e diesel, tem a vantagem do chamado *ciclo fechado* do carbono, que será absorvido no próximo ciclo produtivo da cana-de-açúcar. Assim, a emissão líquida de CO₂ é praticamente nula com o uso da biomassa como combustível (PISTORE, 2004).

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE PREPARO E MOAGEM

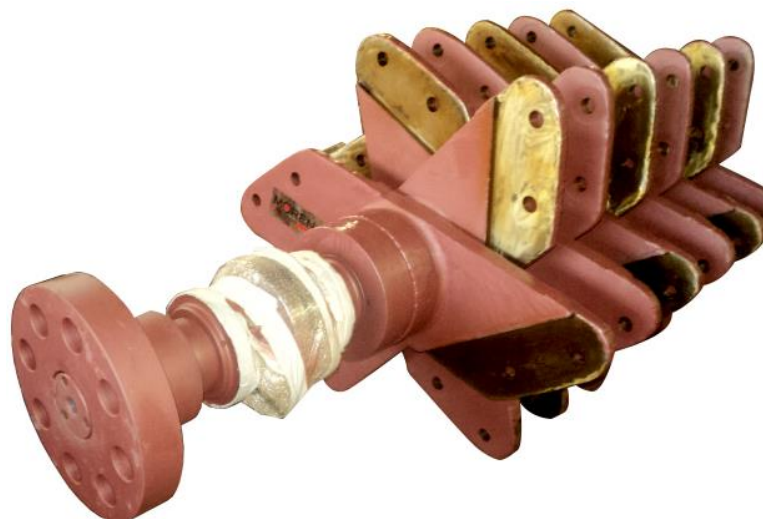
Nesta seção são descritos os principais equipamentos utilizados no processo de preparo (extração do caldo), que se constitui basicamente das cargas mecânicas (cortadores, desfibradores e moendas) e dos motores de indução trifásicos, que terão seus princípios de funcionamento mais detalhados, justificando também suas vantagens em relação aos acionamentos mecânicos.

3.1 CARGAS MECÂNICAS

O processo de preparo da cana-de-açúcar utiliza cargas mecânicas com o objetivo de extrair o caldo de sacarose para a indústria e produzir bagaço, que é direcionado para a caldeira.

A primeira etapa, após a recepção da cana-de-açúcar, consiste em regularizar e uniformizar o fluxo de matéria-prima, além de cortá-la em toletes menores (CHICOA, 2017). Para isso, utiliza-se um equipamento chamado de *cortador*, cujo eixo é composto por facas rotativas, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Facas rotativas de um *picador* de cana-de-açúcar



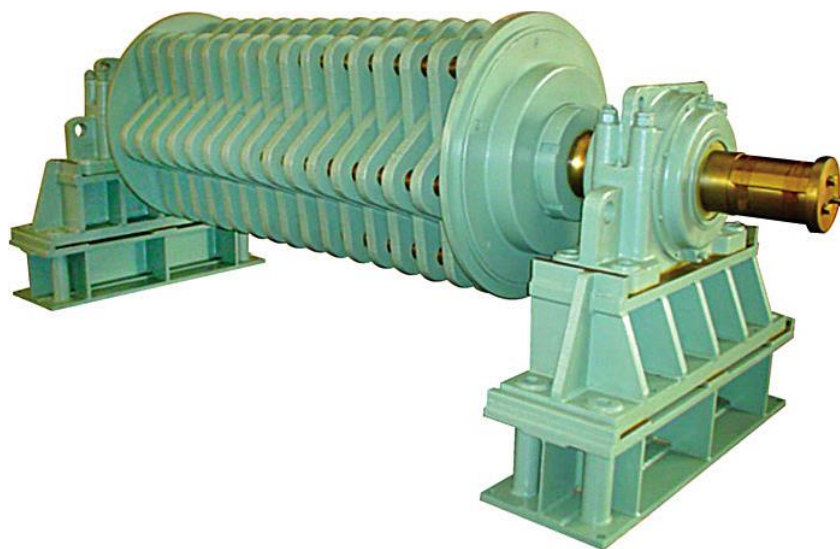
Fonte: (FUNDIÇÃO MORENO, 2025).

Os *picadores* são compostos por uma base de concreto que serve como fundação, seguida de uma base metálica com mancais que sustenta o sistema. O

mecanismo principal inclui um eixo de aço carbono e um suporte de facas, além de um volante de inércia para equilíbrio. As lâminas, feitas de aço carbono revestido de solda dura, são projetadas para ter alta durabilidade, resistência, elasticidade, tenacidade e boa têmpera (CHICOA, 2017).

A cana-de-açúcar picada segue para o *desfibrador*, mostrado na Figura 8, equipamento constituído de eixo de aço, suporte, martelos além de um rolo alimentador e uma placa desfibradora.

Figura 8 – Eixo de um *desfibrador* com martelos rotativos

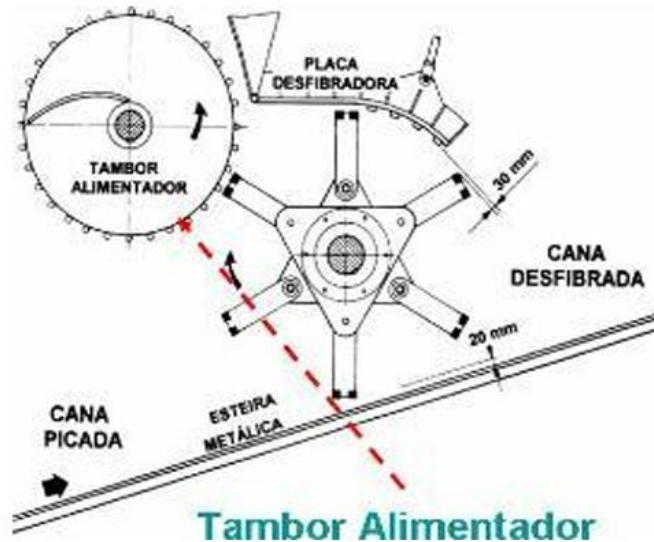


Fonte: (FUNDIÇÃO MORENO, 2025).

O *desfibrador*, instalado na parte inclinada do esteirão e após um jogo de facas rotativas, é composto por um rotor central com suportes triangulares, como ilustrado na Figura 9. Nesses suportes, os martelos são fixados por eixos, permitindo-lhes um movimento oscilante.

A cana-de-açúcar é conduzida até o rotor pelo tambor alimentador, passando então entre o rotor e a placa desfibradora. Essa placa, de aço fundido e com nervuras revestidas de solda dura, tem um formato curvado e é posicionada na parte posterior do rotor, a uma distância de 5 a 7 mm dos martelos (CHICOA, 2017).

Figura 9 – Corte lateral de um *desfibrador*



Fonte: (DEDINI Indústrias de base, *apud* CHICOA, 2017).

O equipamento utilizado é projetado para romper as células vegetais, alcançando uma eficiência de 90% a 94% de células abertas. Essa quebra das células na fibra facilita a extração do caldo, pois permite o uso de menores pressões hidráulicas nos ternos. Desse modo, há uma recuperação significativamente maior do açúcar e uma diminuição do desgaste das moendas (CHICOA, 2017).

O processo seguinte é a moagem que consiste na extração do caldo da cana-de-açúcar, nas *moendas*, ou *ternos de moenda*, como o mostrado na Figura 10.

Figura 10 – *Terno de moenda* de cana-de-açúcar



Fonte: (FUNDAÇÃO MORENO, 2025).

Uma *moenda*, ou *terno de moenda*, é um conjunto de quatro rolos metálicos, que prensam a cana desfibrada de modo a separar o caldo do bagaço, que deve ter a menor umidade possível para ser utilizado como combustível nas caldeiras (CHICOA, 2017).

Um *terno de moenda* é constituído por uma base metálica sobre a qual é montado o castelo, conjunto de estruturas que suportam os cilindros metálicos feitos de aço especial e revestidos de camisas frisadas de ferro fundido. Os quatro rolos metálicos, ilustrados na Figura 11, são dispostos em forma triangular, sendo os rolos inferiores fixos e os superiores trabalhando sob pressão hidráulica.

Figura 11 – Corte lateral dos rolos metálicos de uma moenda de cana-de-açúcar



Fonte: (DEDINI Indústrias de base, *apud* CHICOA, 2017).

O rolo de pressão (localizado na parte superior) compacta a camada de cana que alimenta a moenda. O rolo superior, que recebe a força motriz vinda dos acoplamentos, desempenha um importante papel por ter maior área de contato com a matéria-prima. Já os rolos inferiores, rolo de entrada e de saída, fazem respectivamente, uma pequena extração de caldo e direcionam a cana prensada para a saída (CHICOA, 2017).

As moendas, que são acionadas por turbinas a vapor e mais recentemente por motores elétricos, tem seus rolos superiores girando a velocidades entre 3,5 a 8 rotações por minuto, necessitando serem acopladas por redutores de velocidade (CHICOA, 2017).

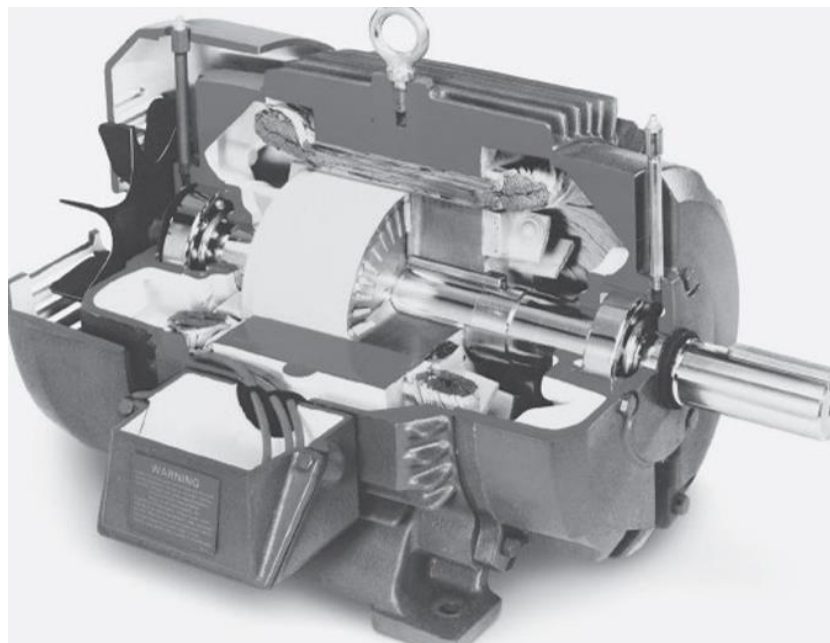
3.2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Nesta seção são descritos os princípios de funcionamento dos motores de indução trifásicos utilizados nos processos de preparo e moagem (como força motriz das cargas mecânicas) e suas vantagens com relação aos acionamentos mecânicos. Também são mencionados os principais tipos de acionamentos desses motores.

3.2.1 Características construtivas dos motores de indução trifásicos

Em termos de conversão eletromecânica de energia, um motor elétrico é um dispositivo que converte energia elétrica em energia mecânica (CHAPMAN, 2013). Uma máquina elétrica, como é o caso de um motor de indução, é constituído basicamente por duas partes principais: rotor que é a parte móvel da máquina, e o estator que é a parte fixa e externa (ALVES, 2021). O conjunto rotor/estator é abrigado dentro de uma carcaça metálica como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Corte longitudinal de um motor de indução trifásico

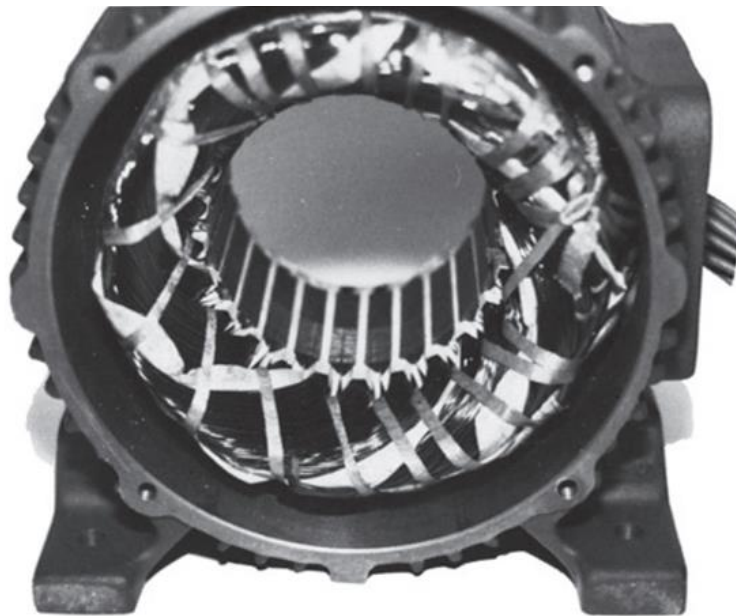


Fonte: (UMANS, 2014).

Em motores de indução, o estator abriga o enrolamento de armadura, denominação usada para referenciar os enrolamentos que conduzem corrente

alternada, CA. O estator é construído de aço elétrico com alta permeabilidade magnética, de modo a concentrar todo campo magnético. É construído com finas chapas metálicas isoladas, com intuito de se reduzir as perdas por *correntes parasitas* (UMANS, 2014). A Figura 13 mostra o estator de um motor de indução trifásico com suas ranhuras que abrigam os enrolamentos trifásicos.

Figura 13 – Estator de um motor de indução

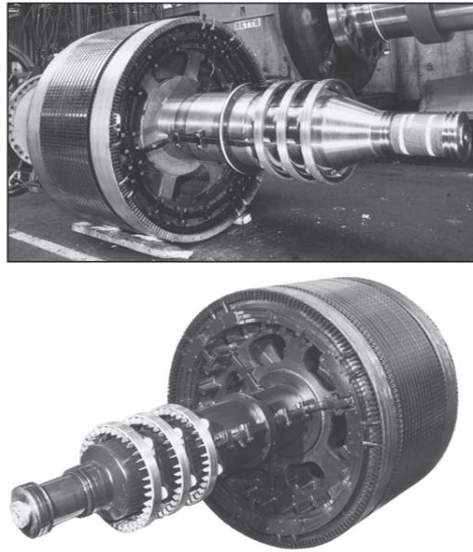


Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Os rotores de motores de indução podem ser de dois tipos: *rotor bobinado* e *gaiola de esquilo*, cada qual apresentando suas vantagens e desvantagens.

O rotor do tipo *bobinado*, é constituído de enrolamentos trifásicos distribuídos de maneira semelhante ao estator, não possuindo ligação elétrica com a fonte de alimentação, conectada aos enrolamentos de armadura. O rotor possui anéis coletores que em contato com escovas, curto-circuitam os enrolamentos (ALVES, 2021). Como vantagem desse tipo de rotor se cita o acesso às correntes dos enrolamentos além da inserção de resistências externas que podem alterar, as características do torque versus a rotação. (CHAPMAN, 2013). Na Figura 14 mostra-se dois rotores bobinados típicos.

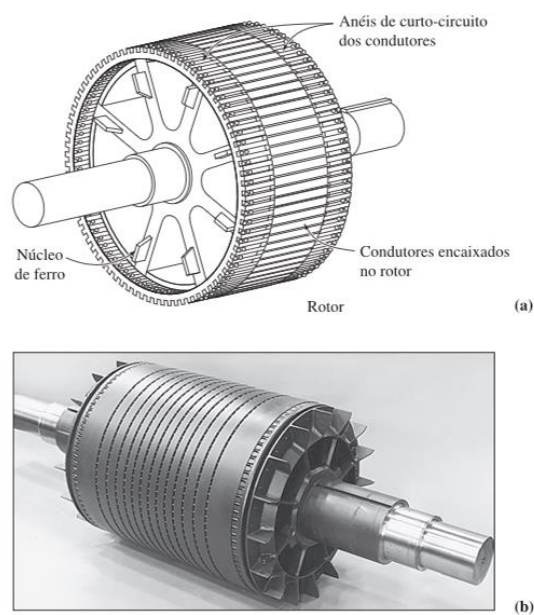
Figura 14 – *Rotores bobinados* de motores de indução trifásicos



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Já o rotor do tipo *gaiola de esquilo*, mostrado na Figura 15, é constituído por barras metálicas em volta do rotor, sendo estas tem suas extremidades curto-circuitadas por anéis metálicos (ALVES, 2021).

Figura 15 – Desenho esquemático (a) e modelo real (b) de um rotor do tipo *gaiola de esquilo*



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Comparando os dois tipos de rotores, verifica-se as vantagens do tipo *gaiola*

de esquilo. Por ser de construção mais simples e não possuir escovas, tem menor custo além de necessitar de menor manutenção (CHAPMAN, 2013).

3.2.2 Enrolamentos concentrados e distribuídos

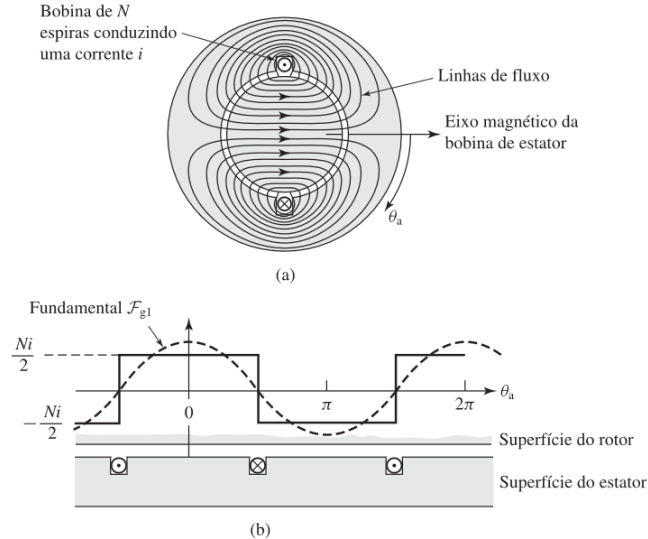
Um fio condutor percorrido por uma corrente elétrica (i) com unidade em *ampère* (A) gera um campo magnético em seu entorno. Esse princípio é explicado pela *Lei de Ampère* (CHAPMAN, 2013) dada por

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{liq}, \quad (1)$$

sendo $\mathbf{H}$ (com unidade de *ampere/m*) o vetor intensidade do campo magnético produzido pela corrente líquida total envolvida pela integral de linha (I_{liq}) em um fio condutor de comprimento l .

Pode-se estudar os campos magnéticos dos enrolamentos nas ranhuras do estator de uma máquina elétrica CA, analisando o campo de um único enrolamento com N espiras (*enrolamento concentrado*), como mostrado na Figura 16-a.

Figura 16 – Vista frontal de uma máquina com enrolamento concentrado (a) e FMM no entreferro (b)



Fonte: (UMANS, 2014).

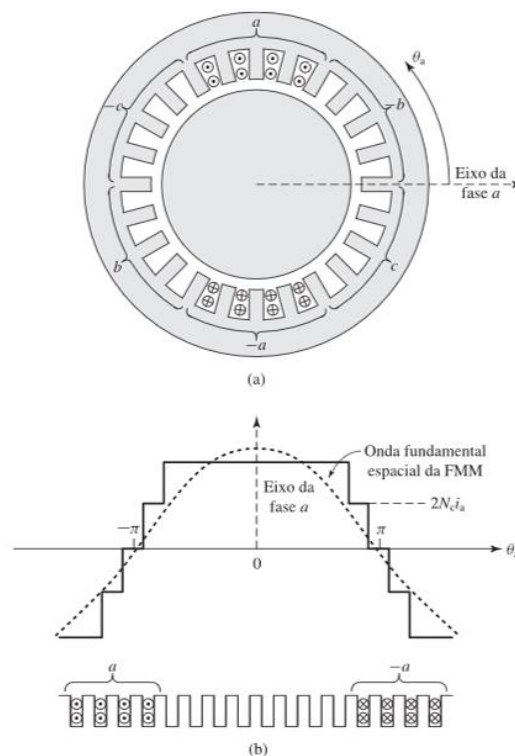
Como a *relutância* dos materiais ferromagnéticos é muito menor do que a relutância do entreferro, pode-se afirmar que a *força magnetomotriz*, FMM, inteira atua no entreferro. Por simetria, os campos magnéticos no entreferro em lados opostos do rotor são iguais, mas em direções opostas. Isso implica que a FMM é distribuída uniformemente no entreferro, como mostrado na forma de onda da Figura 16-b. Como a FMM, com unidade em *ampère.espira* (A.e), é expressa como

$$\mathcal{F} = N \cdot i , \quad (2)$$

e as linhas de campo cruzam o entreferro duas vezes, a FMM é $Ni/2$ (UMANS, 2014).

Normalmente, os enrolamentos das máquinas elétricas, são distribuídos uniformemente ao longo da circunferência tanto do rotor quanto do estator da máquina, como ilustrado na Figura 17-a, em diversas ranhuras (UMANS, 2014).

Figura 17 – Vista frontal de uma máquina trifásica com *enrolamentos distribuídos* (a) e a distribuição espacial de FMM (b)



Fonte: (UMANS, 2014).

Pode-se observar que o corte frontal da máquina mostrada na Figura 17-a tem dois polos por fase, sendo que a distância entre um polo Norte e um polo Sul

adjacentes é o que se denomina como *passo polar* (SIMONE, 2009). Se a distância for de 180° , diz-se que o enrolamento é de *passo pleno* (UMANS, 2014).

No entanto, é comum encontrar máquinas com mais de dois polos. Por exemplo, se há dois pares de polos por fase (4 polos), cada par de polos corresponde a 360° em π radianos na circunferência da máquina. Nestes casos, é conveniente diferenciar radianos elétricos e radianos mecânicos (UMANS, 2014).

A relação entre graus elétricos e mecânicos é dada por:

$$\theta_e = \left(\frac{p}{2}\right) \cdot \theta_m, \quad (3)$$

sendo p é o número de polos, θ_e o ângulo em unidades elétricas e θ_m o ângulo espacial, ambos com unidade em *radianos (rad)* (UMANS, 2014). Aplicando-se a derivada em ambos os lados da equação (3) tem-se que

$$\omega_e = \left(\frac{p}{2}\right) \cdot \omega_m, \quad (4)$$

sendo ω_e a velocidade angular da tensão elétrica e ω_m a velocidade mecânica, ambas com unidade em *radianos por segundo, (rad/s)*.

3.2.3 Ondas girantes de FMM

Nesta seção são estudadas as distribuições de *força magnetomotriz* (FMM) em enrolamentos trifásicos dos motores de indução, especificamente para os casos de máquinas de dois polos., considerando *enrolamentos concentrados* e *passo pleno*.

As bobinas de cada fase (a, b, c) estão espaçadas em 120° mecânicos uma da outra. Cada fase é alimentada por uma corrente alternada que varia no tempo de forma senoidal, defasadas em 120° . Em condições de equilíbrio trifásico, essas correntes instantâneas podem ser descritas por uma função senoidal (UMANS, 2014), como se segue

$$i_a = I_{max} \cdot \text{sen}(\omega_e t), \quad (5)$$

$$i_b = I_{max} \cdot \text{sen}(\omega_e t - 120^\circ), \quad (6)$$

$$i_c = I_{max} \cdot \text{sen}(\omega_e t + 120^\circ). \quad (7)$$

A *força magnetomotriz* produzida por cada uma dessas correntes segue a forma senoidal e também defasadas de 120° como se segue

$$F_a = F_{max} \cdot \text{sen}(\omega_e t), \quad (8)$$

$$F_b = F_{max} \cdot \text{sen}(\omega_e t - 120^\circ), \quad (9)$$

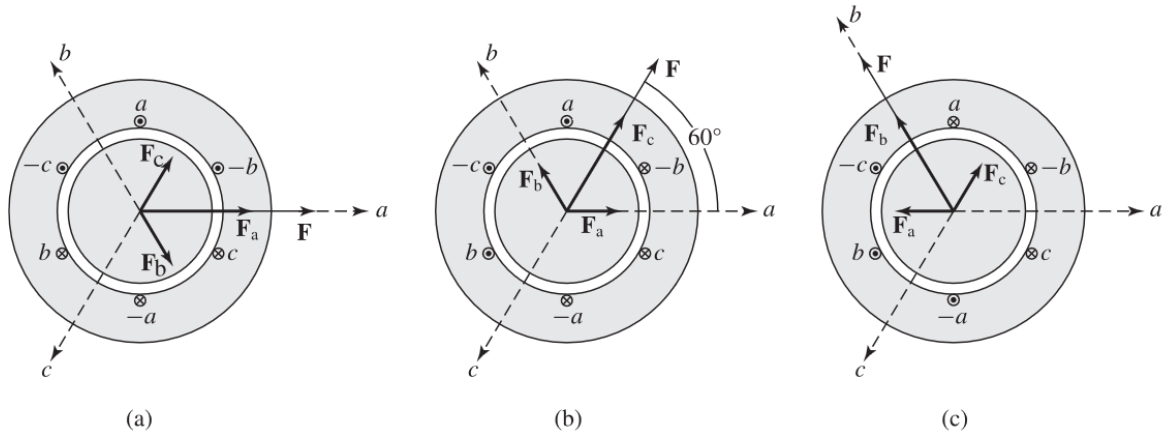
$$F_c = F_{max} \cdot \text{sen}(\omega_e t + 120^\circ). \quad (10)$$

Inicialmente se fará uma análise gráfica, afim de se observar o comportamento da onda de FMM, ao longo do entreferro. Para isso, considera-se o instante $t=0$, como mostrado na Figura 18-a, em que corrente da fase *a* atinge seu valor máximo (I_{max}) resultando em uma FMM também máxima (F_{max}) representada pelo vetor F_a . Nesse mesmo instante, as correntes das fases *b* e *c* são metade do valor máximo (I_{max}) e têm sentido negativo, assim F_b e F_c têm amplitude $F_{max}/2$ e em direções opostas aos seus respectivos eixos. A soma obtida pela contribuição das três FMMs resulta em um vetor final (F) com módulo $3/2F_{max}$.

Fazendo a mesma análise para um instante $\omega_e t = 60^\circ$, como mostrado na Figura 18-b, F_c é máxima e aponta na direção oposta ao respectivo eixo. Já F_a e F_b , apresentam a metade de seus valores máximos. Já em um instante posterior, $\omega_e t = 120^\circ$, como pode ser visto na Figura 18-c, F_b tem amplitude máxima e F_a e F_c têm metade de seus valores máximos no sentido negativo (UMANS, 2014).

Dessa análise, é possível observar que a amplitude do vetor F permanece constante ($3/2F_{max}$) e gira em sentido anti-horário. Assim, passado um ciclo elétrico, F retorna para a mesma posição em $t=0$. Se por exemplo a máquina tiver mais polos, uma revolução completa de F acontece em $(p/2)$ de um ciclo elétrico (UMANS, 2014).

Figura 18 – Análise gráfica do campo magnético girante



Fonte: (UMANS, 2014).

Para provar algebricamente a presença de uma FMM girante, parte-se do fato de as correntes trifásicas defasadas de 120° elétricos, em enrolamentos espaçados de 120° mecânicos, produzem uma distribuição espacial de *força magnetomotriz* no entreferro (UMANS, 2014). Para cada fase tem-se

$$F_a = F_{max} \cdot \cos(\theta_e) \cdot \cos(\omega_e t), \quad (11)$$

$$F_b = F_{max} \cdot \cos(\theta_e - 120^\circ) \cdot \cos(\omega_e t - 120^\circ), \quad (12)$$

$$F_c = F_{max} \cdot \cos(\theta_e + 120^\circ) \cdot \cos(\omega_e t + 120^\circ) \quad (13)$$

sendo θ_e o ângulo espacial elétrico escrito na forma $(p/2) \cdot \theta_m$.

Utilizando uma identidade trigonométrica apropriada, pode-se escrever cada expressão da distribuição de FMM da seguinte maneira

$$F_a = \frac{1}{2} F_{max} \cdot [\cos(\theta_e - \omega_e t) + \cos(\theta_e + \omega_e t)], \quad (14)$$

$$F_b = \frac{1}{2} F_{max} \cdot [\cos(\theta_e - \omega_e t) + \cos(\theta_e + \omega_e t + 120^\circ)], \quad (15)$$

$$F_c = \frac{1}{2} F_{max} \cdot [\cos(\theta_e - \omega_e t) + \cos(\theta_e + \omega_e t - 120^\circ)]. \quad (16)$$

Assim, cada expressão de FMM pode ser decomposta em duas ondas que giram no sentido positivo de (F^+) e no sentido negativo (F^-) de θ_e . Para a fase a tem-se

$$F_a^+ = \frac{1}{2} F_{max} \cdot \cos(\theta_e - \omega_e t), \quad (17)$$

$$F_a^- = \frac{1}{2} F_{max} \cdot \cos(\theta_e + \omega_e t). \quad (18)$$

Para as fases b e c tem-se respectivamente

$$F_b^+ = \frac{1}{2} F_{max} \cdot \cos(\theta_e - \omega_e t), \quad (19)$$

$$F_b^- = \frac{1}{2} F_{max} \cdot \cos(\theta_e + \omega_e t + 120^\circ), \quad (20)$$

$$F_c^+ = \frac{1}{2} F_{max} \cdot \cos(\theta_e - \omega_e t), \quad (21)$$

$$F_c^- = \frac{1}{2} F_{max} \cdot \cos(\theta_e + \omega_e t - 120^\circ). \quad (22)$$

A onda de *força magnetomotriz* (F) é a soma das componentes das três fases. Assim tem-se

$$F = F^+ + F^- = (F_a^+ + F_b^+ + F_c^+) + (F_a^- + F_b^- + F_c^-), \quad (23)$$

sendo que F^- e F^+ são respectivamente

$$F^- = \frac{1}{2} F_{max} \cdot [\cos(\theta_e + \omega_e t) + \cos(\theta_e + \omega_e t - 120^\circ) + \cos(\theta_e + \omega_e t + 120^\circ)], \quad (24)$$

$$F^- = 0, \quad (25)$$

$$F^+ = \frac{1}{2} F_{max} \cdot [\cos(\theta_e - \omega_e t) + \cos(\theta_e - \omega_e t) + \cos(\theta_e - \omega_e t)], \quad (26)$$

$$F^+ = \frac{3}{2} F_{max} \cdot \cos(\theta_e - \omega_e t) \quad (27)$$

Assim, a onda de FMM no entreferro de uma máquina CA com correntes trifásicas equilibradas, é

$$F = F^+ + F^- = \frac{3}{2} F_{max} \cdot \cos(\theta_e - \omega_e t), \quad (28)$$

ou seja, uma onda senoidal que gira na direção de $-\theta_e$ com velocidade espacial angular síncrona, ω_s , dada por

$$\omega_s = \left(\frac{2}{p}\right) \cdot \omega_e, \quad (29)$$

sendo ω_e a velocidade angular com base na frequência da excitação elétrica. Como $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ a velocidade do campo magnético, em rotações por minuto (*rpm*) é

$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{p}. \quad (30)$$

Dessa maneira, fica demonstrado o princípio do campo magnético girante, vital para o entendimento do funcionamento dos motores de indução trifásicos.

3.2.4 Princípios do funcionamento do MIT

No estator dos motores de indução trifásicos, um conjunto de enrolamentos trifásicos, separados no espaço por 120° , são alimentados por correntes trifásicas senoidais equilibradas. Nestas condições, surge um campo magnético girante com velocidade síncrona dada pela equação (30).

Da *Lei de Faraday*, sabe-se que a tensão induzida (e_{ind}) é igual à taxa de variação do fluxo magnético no tempo. Nos terminais de um condutor em movimento (neste caso uma das barras do rotor) imerso em um campo com densidade magnética

($\mathbf{B}$) com unidade em *Webber por metro quadrado* (Wb/m^2) ou *tesla* (T), tem-se uma tensão induzida (CHAPMAN, 2013) dada por

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} , \quad (31)$$

com unidade em *volts* (V) no SI (Sistema Internacional) sendo $\mathbf{v}$ e $\mathbf{l}$ a velocidade linear (m/s) e o comprimento, em *metros*, do condutor respectivamente.

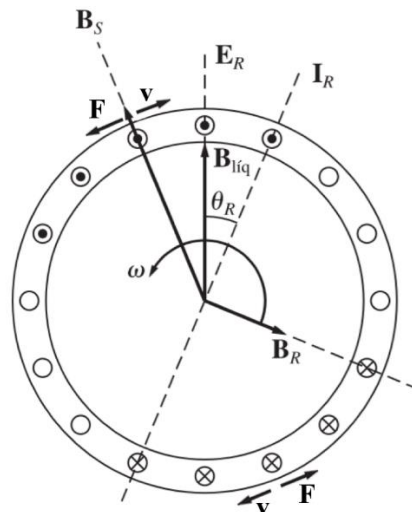
Inicialmente o rotor está em repouso, mas o campo magnético do estator ($\mathbf{B}_s$) está se movendo com velocidade síncrona (ω_s) como ilustrado na Figura 19. Logo, há um movimento relativo do rotor em relação ao campo, com sentido contrário a ω_s , o que permite o aparecimento de uma tensão induzida em uma das barras do motor (CHAPMAN, 2013).

A tensão induzida faz surgir nas barras, que estão curto-circuitadas nas extremidades, correntes elétricas. Da *Lei da Força de Lorentz* (UMANS, 2014), sabe-se que um condutor conduzindo corrente elétrica em um campo magnético ($\mathbf{B}$) externo fica sujeita à ação de uma força ($\mathbf{F}$) com unidade *newton* (CHAPMAN, 2023) dada por

$$\mathbf{F} = i.(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) . \quad (32)$$

Assim, analisando a Figura 19, tem-se que a força sobre cada barra tem direção tal, que permite o aparecimento de um torque, de modo que o rotor gire sobre seu eixo em sentido anti-horário (CHAPMAN, 2013).

Figura 19 – Corte de rotor de um MIT sob ação do campo $\mathbf{B}_s$



Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013).

Entretanto, se o rotor acelera e atinge a velocidade síncrona, a velocidade relativa entre o campo magnético e o rotor se torna nula. Assim, não há corrente induzida nas barras do rotor, o que por sua vez, torna a força sobre estas nulas, e consequentemente o rotor tende a desacelerar devido as perdas por atrito. Logo, o motor de indução, nunca pode atingir a velocidade síncrona, de modo que a velocidade em regime permanente seja sempre um pouco menor do que ω_s (CHAPMAN, 2013).

3.2.5 Escorregamento do MIT

Na seção anterior foi visto que, sempre deve haver uma velocidade relativa entre o rotor e o campo girante produzido pelas correntes trifásicas equilibradas no estator do MIT. Assim pode-se definir a *velocidade de escorregamento* (n_{esc}) que é a diferença entre a velocidade do rotor e da velocidade síncrona do campo (CHAPMAN, 2013), como sendo

$$n_{esc} = n_s - n_m , \quad (33)$$

sendo n_s a velocidade síncrona do campo girante e n_m a velocidade mecânica do rotor.

Define-se também o que se denomina de *escorregamento* (s) que é a velocidade relativa entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona. É expresso por

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{n_{esc}}{n_s} . \quad (34)$$

Da equação (34) pode-se ainda retirar a seguinte igualdade

$$n_m = (1 - s) \cdot n_s , \quad (35)$$

que em *rad/s* é

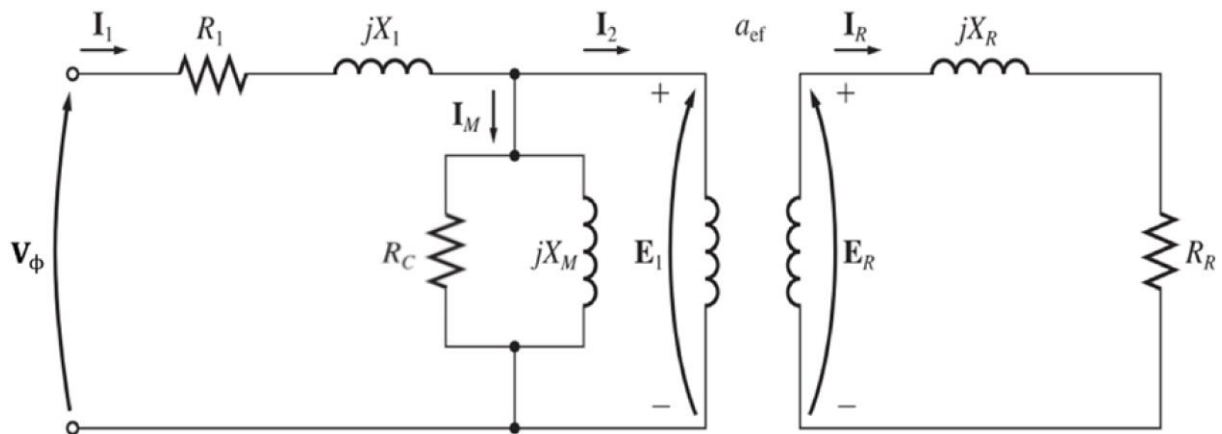
$$\omega_m = (1 - s) \cdot \omega_s . \quad (36)$$

Da equação (36) é possível deduzir que, se a velocidade de escorregamento for nula, ou seja, o rotor girando em velocidade síncrona, $s = 0$. Se a velocidade do rotor for nula, condição chamada de *rotor bloqueado ou travado*, $s = 1$. Assim, a faixa de operação do motor sempre estará neste intervalo (CHAPMAN, 2013).

3.2.6 Circuito equivalente do MIT

Um motor de indução funciona de forma similar a um transformador. As correntes trifásicas no estator, induzem tensões e correntes nas barras do rotor. Sendo assim, o circuito equivalente por fase de um MIT, é semelhante ao do transformador, como mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Circuito equivalente do transformador aplicado ao MIT



Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013).

Nos enrolamentos do primário, alimentados por uma tensão (V_ϕ) do modelo equivalente (estator) há certa resistência elétrica e também autoindutância. Desse modo, no circuito equivalente, a resistência (R_1) e a reatância de dispersão (L_1) são inseridos na entrada (CHAPMAN, 2013).

Por esses componentes, passa a corrente (I_1) que alimenta a fase do motor. Essa corrente se divide na corrente de carga (I_2) responsável por uma FMM correspondente no rotor do motor, e na corrente de magnetização (I_M) responsável por criar o fluxo no entreferro, sendo função de E_1 . A corrente de excitação percorre

R_c , responsável pelas perdas no núcleo, e X_M , que é a reatância de magnetização (UMANS, 2014).

A tensão interna do estator (E_1) e a tensão do rotor (E_R) estão ligadas por uma relação de espiras efetivas (a_{ef}). Em motores com rotor bobinado é fácil de se determinar essa relação, porém, em rotores gaiola de esquilo, encontrar a_{ef} é mais complicado devido a não ser possível ver enrolamentos no rotor.

A tensão induzida no rotor (secundário) gera uma corrente em seu circuito, que está em curto-circuito. As impedâncias do estator e a corrente de magnetização do motor são análogas às de um transformador. A principal diferença entre os circuitos equivalentes do motor de indução e do transformador está na forma como as variações de frequência afetam a tensão do rotor e suas impedâncias, X_R e R_R (CHAPMAN, 2013).

As tensões induzidas no rotor de um motor de indução são proporcionais à velocidade relativa entre o rotor e o campo magnético girante. Conforme essa velocidade aumenta, a tensão e a frequência induzidas no rotor também aumentam. Sendo assim, tensão e frequência no rotor dependem do escorregamento. Na condição de rotor bloqueado ($s = 1$), a velocidade relativa é máxima, resultando em tensões e frequências máximas no rotor. Por outro lado, na condição de escorregamento nulo ($s = 0$), não há movimento relativo entre o rotor e o campo, o que faz com que as tensões e as frequências induzidas sejam nulas (CHAPMAN, 2013). A tensão induzida, E_R , e sua frequência (f_{re}) em Hz, para o circuito equivalente, são dadas, respectivamente por

$$E_R = s \cdot E_{R0} , \quad (37)$$

$$f_{re} = s \cdot f_{se} , \quad (38)$$

sendo que E_{R0} e f_{r0} são a tensão e a frequência para a condição de rotor bloqueado, respectivamente.

Como uma reatância depende da frequência, então X_R , é afetada pelo escorregamento, s . Assim tem-se

$$X_R = 2\pi \cdot f_{re} \cdot L_R = 2\pi \cdot s \cdot f_{se} \cdot L_R , \quad (39)$$

$$X_R = s \cdot (2\pi \cdot f_{re} \cdot L_R) = s \cdot X_{R0} , \quad (40)$$

sendo L_R a indutância do rotor, em *henry*, e X_{R0} a reatância do rotor, em Ω , na condição de rotor bloqueado.

Assim, a corrente no estator é dada por

$$\mathbf{I}_R = \frac{\mathbf{E}_R}{R_R + jX_R} = \frac{\mathbf{E}_{R0}}{(R_R/s) + jX_{R0}} . \quad (41)$$

Para terminar a dedução do circuito equivalente do motor de indução, é necessário referir as grandezas do estator para o rotor de modo semelhante ao que se faz no caso do transformador (CHAPMAN, 2013). Dessa maneira, a tensão, a corrente e a impedância do rotor referidas para o estator são, respectivamente

$$\mathbf{E}'_R = \mathbf{E}_2 = a_{ef} \cdot \mathbf{E}_{R0} , \quad (42)$$

$$\mathbf{I}'_R = \mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{E}_{R0}}{a_{ef}} , \quad (43)$$

$$Z'_R = Z_2 = a_{ef}^2 \cdot \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) . \quad (44)$$

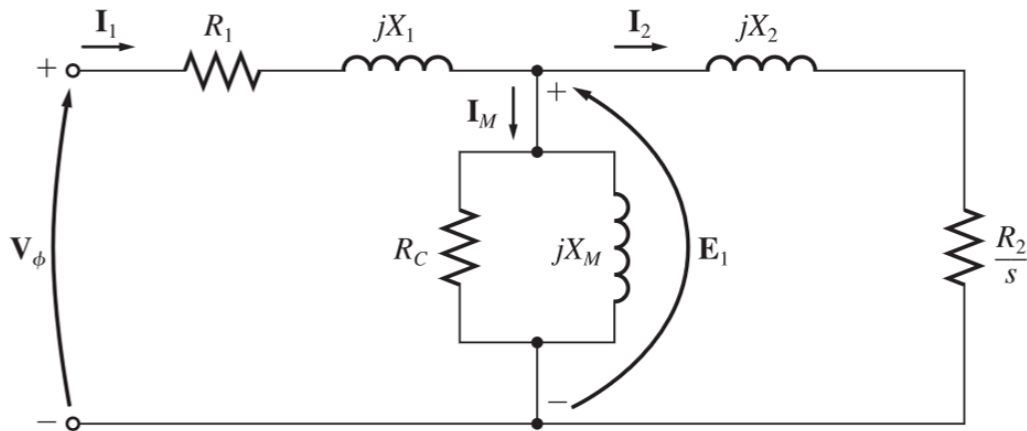
Pode-se ainda definir R_2 e X_2 , respectivamente, como se segue

$$R_2 = a_{ef}^2 \cdot \frac{R_R}{s} , \quad (45)$$

$$X_2 = a_{ef}^2 \cdot X_{R0} . \quad (46)$$

Assim, tem-se o circuito equivalente por fase de um motor de indução trifásico mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Circuito equivalente por fase de um MIT, com grandezas do rotor referidas ao estator



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Para se obter os parâmetros do circuito equivalente do MIT, são realizados alguns ensaios: *ensaio CC*, que permite encontrar o valor de R_1 , *ensaio a vazio ou sem carga*, que permite encontrar R_C , X_1 e X_M e *ensaio com rotor travado*, que permite obter os valores de X_2 e R_2 (UMANS, 2014).

3.2.7 Análise do circuito equivalente

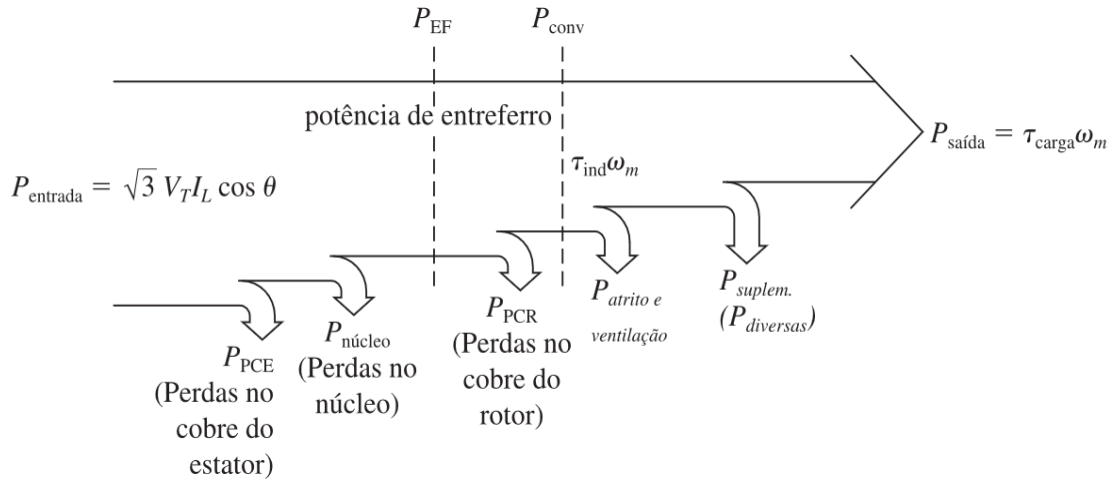
Nesta seção, o circuito equivalente será analisado afim de se definir as potências e perdas envolvidas. A Figura 22 mostra o diagrama do fluxo de potência em um motor de indução.

A *potência de entrada* ($P_{entrada}$) em watt, é proveniente da fonte de tensão trifásica e vale

$$P_{entrada} = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_1 \cdot \cos(\theta), \quad (47)$$

sendo θ o ângulo de defasagem entre V_{ϕ} e I_1 .

Figura 22 – Diagrama de fluxo de potência de um MIT



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Seguindo o diagrama de fluxo de potência (P_{PCE}) representa as *perdas no cobre* do estator, devido à resistência dos enrolamentos, R_1 , e são expressas por

$$P_{\text{PCE}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1^2. \quad (48)$$

A seguir, são representadas as *perdas no núcleo* ($P_{\text{núcleo}}$) devidos às correntes parasitas e à histerese magnética como se segue

$$P_{\text{núcleo}} = \frac{3 \cdot E_1^2}{R_c}. \quad (49)$$

As perdas no núcleo podem variar de posição no diagrama de fluxo de potência, pois ocorrem tanto no circuito do estator quanto do circuito do rotor. Em motores de indução, as perdas no núcleo ocorrem de forma predominante no estator. Isso se deve ao fato de o rotor operar a uma velocidade muito próxima da velocidade síncrona, resultando em uma velocidade relativa baixa do campo sobre o rotor, resultando em perdas pequenas. Por essa razão, todas as perdas no núcleo são representadas no estator e modeladas no circuito equivalente pelo resistor R_c . Alternativamente, se o valor das perdas for conhecido, é comum combiná-las com as perdas mecânicas no diagrama de fluxo de potência (CHAPMAN, 2013).

Após as perdas no estator, tem-se o que se chama de potência de entreferro, P_{EF} , que consiste na potência entregue ao rotor do MIT, que é expressa por

$$P_{EF} = P_{entrada} - P_{PCE} - P_{núcleo} , \quad (50)$$

$$P_{EF} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s} \right) . \quad (51)$$

A seguir tem-se as *perdas no cobre do rotor* (P_{PCR}) dadas por

$$P_{PCR} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = s \cdot P_{EF} . \quad (52)$$

Após as *perdas no cobre do rotor*, tem-se a chamada *potência mecânica desenvolvida* (P_{conv}) que é expressa por

$$P_{conv} = P_{EF} - P_{PCR} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) . \quad (53)$$

Verifica-se que a *potência mecânica desenvolvida*, também é dependente do escorregamento. Se s é próximo de 1, então a potência elétrica convertida em mecânica é muito baixa. Isso está de acordo com equação (52) pois, se o rotor estiver com baixa velocidade, há mais potência dissipada no cobre do rotor. Se o escorregamento for próximo de zero (rotor próximo à velocidade síncrona), a potência convertida é maior e consequentemente as perdas no cobre do rotor diminuem (CHAPMAN, 2013).

Já o *torque induzido* (T_{ind}), em *newton.metro* (N.m), é dado por

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} . \quad (54)$$

Analisando a equações (36) e (53), deduz-se que o *torque induzido* também pode ser expresso como

$$T_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_s} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s \cdot \omega_s} \right) . \quad (55)$$

Por fim, se as *perdas por atrito e ventilação* (P_{AeV}) e as *perdas suplementares* (P_{suplem}) forem conhecidas (CHAPMAN, 2013), subtraindo-as de P_{conv} tem-se a *potência de saída* ($P_{saída}$) como segue

$$P_{saída} = P_{conv} - P_{AeV} - P_{suplem} . \quad (56)$$

Assim, após todas as perdas no rotor e no estator, tem-se que *potência de saída* é a potência mecânica efetivamente disponível na ponta do eixo do MIT. Desse modo, pode-se definir o rendimento do motor como

$$\eta(\%) = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} 100\% . \quad (57)$$

A eficiência no uso da energia, é o fator determinante para o emprego do motor de indução trifásico no acionamento das cargas mecânicas no processo de preparo e extração em usinas sucroalcooleiras.

3.2.8 Curva característica de torque *versus* velocidade do MIT

Anteriormente, foi encontrado o torque induzido do motor de indução em função de sua velocidade, como expresso em (53) e (54). Uma forma alternativa de encontrar a expressão do torque induzido, utiliza o circuito equivalente de *Thevénin*, por fase do MIT. Para facilitar sua obtenção a partir do circuito equivalente por fase do MIT, faz-se uma simplificação que consiste em omitir R_c , e incorporar as *perdas no núcleo* nas *perdas rotacionais* desde que se considere o motor operando próximo da velocidade e da tensão nominais (UMANS, 2014).

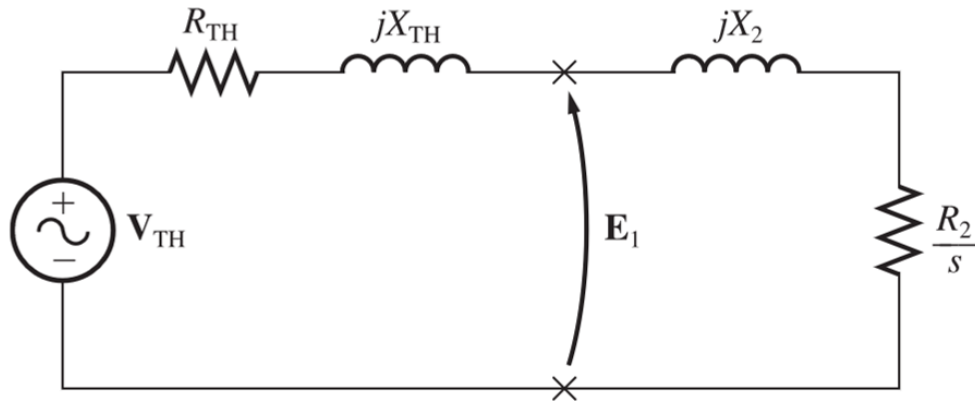
Considerando $X_M \gg X_1$, $X_M \gg R_1$ e $X_M X_1 \gg R1$ (CHAPMAN, 2013), é possível aproximar a tensão e a impedância de *Thevénin* que são, respectivamente, dadas por

$$V_{TH} \cong V_{\phi} \cdot \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right) , \quad (58)$$

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} \cong R_1 \cdot \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 + jX_1. \quad (59)$$

Dessa maneira, tem-se o circuito de *Thevénin*, mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Circuito equivalente de *Thevénin* por fase de um MIT



Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013).

Com os valores de V_{TH} , Z_{TH} e X_2 é possível encontrar a corrente I_2 que é dada por

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_1)^2}}. \quad (60)$$

Aplicando na equação (51) tem-se

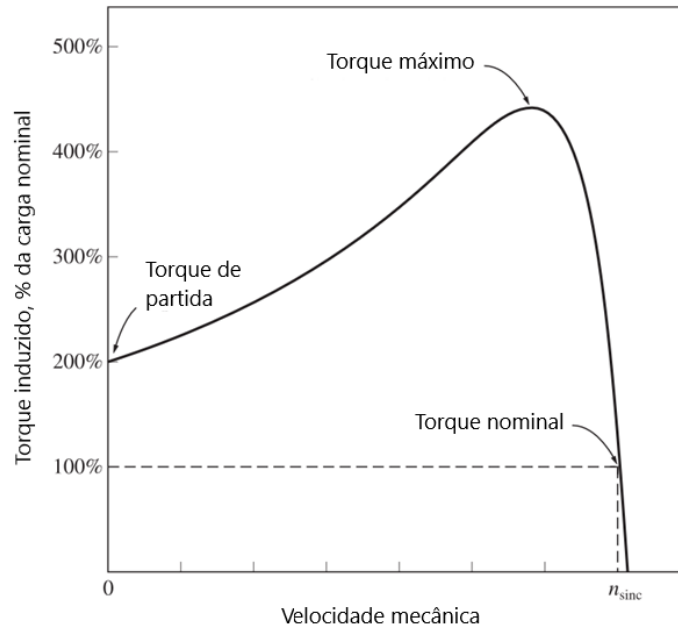
$$P_{EF} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_1)^2}. \quad (61)$$

Aplicando a potência na equação (55) tem-se que

$$T_{ind} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot (R_2/s)}{\omega_s \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_1)^2 \right]}. \quad (62)$$

Na Figura 24, mostra-se a curva característica do torque em função da velocidade do rotor, ou escorregamento, do MIT.

Figura 24 – Curva de torque *versus* velocidade de um típico MIT



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Na curva de torque *versus* velocidade do MIT, pode-se confirmar que na velocidade síncrona (n_{sinc}) não há *torque induzido*, pois nesse ponto, a tensão induzida é nula. Pode-se observar que, entre o torque de plena carga e próximo de n_{sinc} , (ponto em que o MIT opera sem carga), a curva de torque é aproximadamente linear. Também é possível observar que o MIT apresenta um valor de torque máximo (CHAPMAN, 2013), que é dado por

$$T_M = \frac{3 \cdot V_{TH}^2}{2 \cdot \omega_s \cdot \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_1)^2} \right]}. \quad (63)$$

O escorregamento em que o torque é máximo, é

$$s_M = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_1)^2}}. \quad (64)$$

A curva característica de torque *versus* velocidade do MIT apresentada na Figura 24, apresenta variações com relação ao torque, corrente de partida e escorregamento (com carga nominal). Com relação a isso, no Brasil a norma ABNT

15626-1 divide os motores de indução trifásicos em três categorias (ABNT, 2002, *apud* CARVALHO, 2010).

Motores da categoria N possuem torque e corrente de partida normais e baixo escorregamento, sendo utilizados nas mais variadas cargas como ventiladores e bombas. Motores da categoria H possuem torque de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento sendo ideais para cargas como correias transportadoras por exemplo. Já os motores da categoria D são caracterizados por possuírem torque de partida alto, corrente de partida normal e alto escorregamento, utilizado em prensas excêntricas, por exemplo (ABNT, 2002, *apud* CARVALHO, 2010).

3.2.9 Métodos de partida de MITs aplicados ao processo de preparo e extração

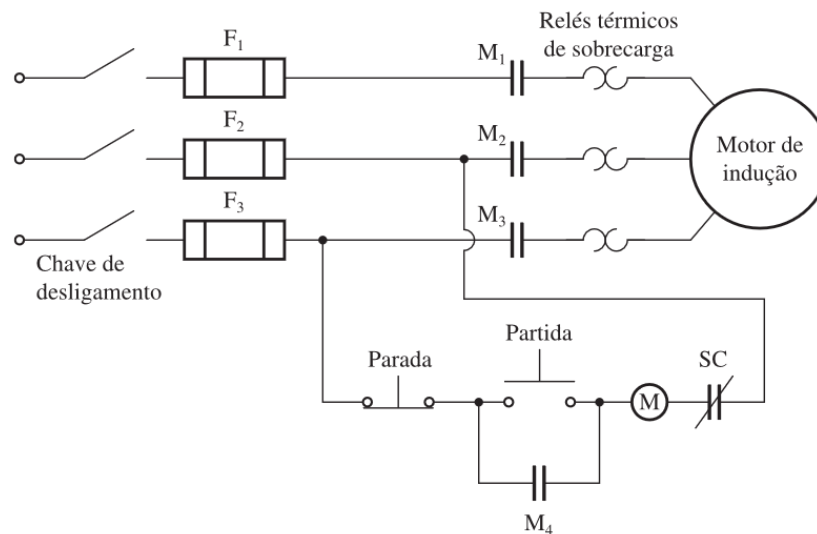
Nesta seção, são apresentados alguns métodos de partida e controle de velocidade aplicados aos MITs e seu uso em específico nas cargas encontradas no processo de preparo e extração de usinas de açúcar e álcool.

3.2.9.1 Métodos de partida de MITs

Para os motores elétricos utilizados em picadores, desfibradores e moendas, é essencial a definição de um sistema de partida e controle de velocidade que atenda às exigências operacionais de cada aplicação (CHICOA, 2017).

O primeiro método de partida é chamado de *partida direta*, que consiste em aplicar integralmente a tensão da rede, direto no MIT. Um típico diagrama de *partida direta*, é mostrado na Figura 25. A solução de partida direta de motores é a mais simples e acessível do mercado, e tem como maiores vantagens, o tempo de aceleração reduzido e um torque de partida nominal. Como desvantagens pode-se citar, as correntes de partida elevadas — de 5 a 8 vezes a corrente nominal — o que pode causar quedas de tensão na rede de alimentação além do estresse mecânico causado nos acoplamentos entre o motor e a carga (CHICOA, 2017).

Figura 25 – Diagrama típico de partida direta de um MIT



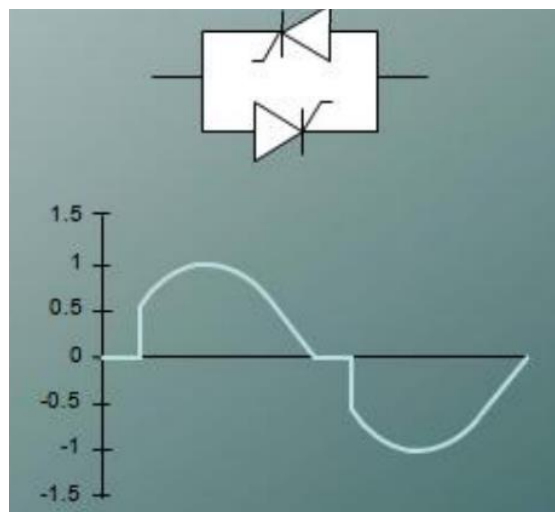
Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Em picadores e desfibradores, que exigem alto torque de partida, devido a característica de torque constante em toda faixa de rotação, esse método é uma solução viável somente para níveis de tensão de 13,8 kV, e com o uso de redutores de velocidade. Nesses níveis de tensão, as altas potências resultam em baixas correntes, o que ajuda a manter as quedas de tensão dentro dos limites aceitáveis. Os redutores atuam como multiplicadores de torque, essenciais para superar a inércia da carga. No entanto, é crucial observar a limitação do número de partidas consecutivas. Devido aos limites térmicos do motor, a maioria dos modelos de média tensão suporta, em geral, três partidas consecutivas a frio e duas partidas consecutivas a quente. Para os ternos de moenda, o uso de sistemas de partida direta não é viável devido a necessidade de variação de velocidade conforme a demanda além do fato de que os estresses mecânicos gerados por esse tipo de partida podem comprometer a estrutura dos rolos (CHICOA, 2017).

Um segundo método de partida é por *Softt Starters*, que são dispositivos eletrônicos estáticos que controlam a partida e a parada de motores elétricos, compostos por dois ou três tiristores, SCRs, (Silicon Controlled Rectifier) em configuração antiparalelo, como mostrado na Figura 26. O controle da tensão de saída é feito por placas internas que ajustam o ângulo de disparo dos SCRs, permitindo reduzir os picos de corrente de partida e o estresse mecânico nos acoplamentos entre o motor e a carga. Após a conclusão da aceleração, os SCRs funcionam como um curto-circuito, e o motor opera com a tensão nominal.

Apesar de seus benefícios, a partida suave resulta em um torque de partida baixo, o que a torna inadequada para aplicações com alta inércia e torque elevado, como picadores e desfibradores. Da mesma forma, em ternos de moenda, *soft starters* não são aplicadas, pois não permitem a variação de velocidade, sendo úteis apenas na partida e na parada (CHICOA, 2017).

Figura 26 – Tiristores em anti-paralelo e forma de onda de tensão na saída de um *soft-starter*

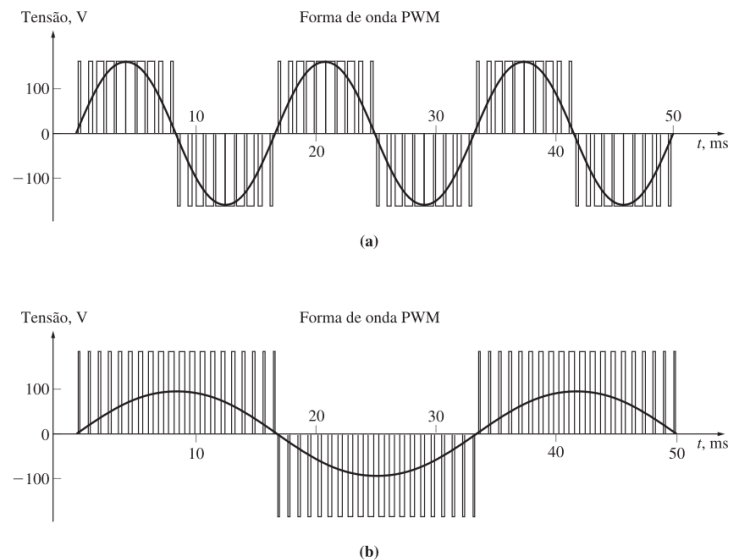


Fonte: (CHICOA, 2017).

Um terceiro método, este mais sofisticado, é o uso de *inversores de frequência*, que são destinados a controlar a velocidade de rotação do motor. São compostos basicamente por três partes: módulo Retificador, responsável por retificar a tensão de alimentação da rede elétrica, um circuito intermediário para estabilização das oscilações da tensão retificada, e módulo inversor que permite a variação da tensão e da frequência por meio de modulação de frequência por largura de pulsos, PWM (CHICOA, 2017), como mostrado na Figura 27.

Na Figura 28-a, é possível observar forma da tensão na saída de um inversor, que alimenta um MIT, com 120 V de tensão eficaz e 60 Hz. Já a forma da tensão mostrada na Figura 28-b, frequência e tensão são reduzidas pela metade.

Figura 27 – Formas de onda de tensão na saída de um inversor de frequência com 120 V e 60 Hz (a) e 60 V e 30 Hz (b)

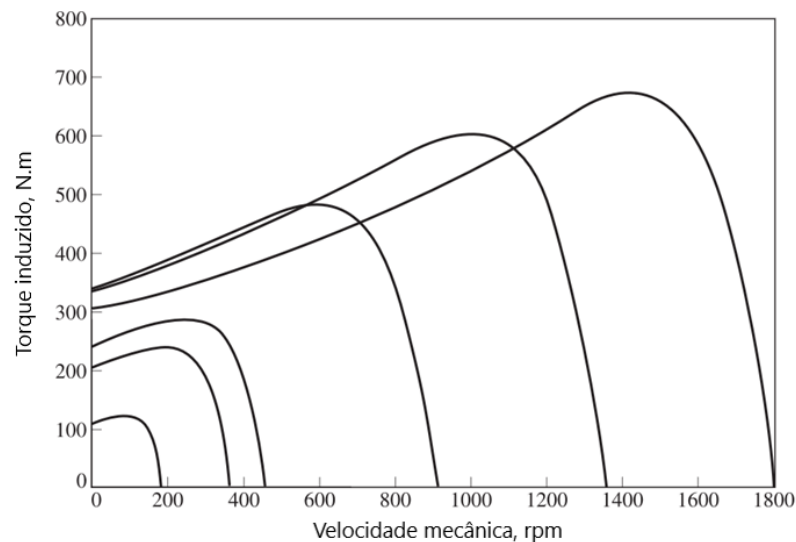


Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013).

Da equação (30) pode-se inicialmente observar que a velocidade síncrona é dependente da frequência elétrica de alimentação. Dessa forma, n_s varia proporcionalmente à variação da frequência, permitindo assim controlar a velocidade do rotor do MIT (CHAPMAN, 2013).

Porém, como as reatâncias dependem da frequência, analisando o circuito equivalente, pode-se deduzir que, a reatância de magnetização (X_M) é alterada com a mudança na frequência de alimentação do MIT, alterando assim o fluxo, devido a variação da corrente de magnetização (I_M). Como as máquinas elétricas já operam próximas a região de saturação, uma diminuição de f_e , pode saturar o núcleo. Da equação (62) verifica-se ainda que, o torque também pode ser alterado. Esse inconveniente pode ser resolvido alterando a tensão de alimentação, juntamente com a frequência, de modo a manter a relação *tensão/frequência* constante, permitindo manter o fluxo magnético constante, além de torque nominal já na partida (CAPMAN, 2013). Na Figura 28, mostra-se várias curvas típicas do torque *versus* velocidade, para cada frequência.

Figura 28 – Curvas de torque *versus* velocidade de um MIT para diferentes frequências



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Os *inversores de frequência*, que se destacam pela alta eficiência (acima de 96%), têm sido cada vez mais usados devido à redução de custos de componentes de eletrônica de potência. Apesar do preço inicial elevado, eles oferecem economia de energia e controle preciso de velocidade, sendo ideais para aplicações com variação de carga (CHICOA, 2017).

3.2.9.2 Uso dos inversores de frequência nos equipamentos de preparo e extração

Para o uso em picadores e desfibradores, devido à alta potência (entre 1000 cv e 7000 cv) e aos níveis de tensão (4.16 kV a 13.8 kV) dos motores utilizados, o custo dos *inversores de frequência* é elevado. Para economizar, utiliza-se apenas um conversor para a partida sequencial de ambos os motores, mostrados na Figura 29 usando um sistema de transferência síncrona ou assíncrona (CHICOA, 2017).

No sistema de transferência síncrona, um único conversor de frequência de média tensão dá a partida em motores de forma sequencial. O motor parte sem carga, e, ao atingir a rotação nominal, é transferido para a rede elétrica após o sincronismo de tensão e frequência, o que é essencial para evitar altas correntes de partida e danos aos acoplamentos mecânicos. É necessário o uso de reatores afim de se evitar

picos de tensão durante a transferência para a rede. Após este processo o inversor fica livre para partir o outro motor (CHICOA, 2017).

Figura 29 – Motores de indução trifásicos empregados no processo de preparo



Fonte: (WEG, 2025).

Já o sistema de transferência assíncrona é utilizado quando se tem diferença entre os níveis de tensão dos motores. Nesse método, o conversor realiza a partida sequencial e em vazio dos motores, retirando a alimentação por alguns microssegundos para que a rede elétrica assuma o controle, não havendo sincronização. Embora isso cause um leve estresse mecânico, dispensa-se o uso de reatores, pois a ausência de alimentação durante a transição impede picos de tensão (CHICOA, 2017).

O uso de *inversores de frequência* em moendas permite ajustar a velocidade de operação conforme a demanda, o que otimiza o processo e economiza energia. Os motores empregados em motores de moendas, como os mostrados na Figura 30, têm tensões típicas de 440 V, 460 V e 690 V em baixa tensão, e de 2,3 kV, 4,16 kV e 6,6 kV em média tensão, com potências que variam entre 700 cv a 2500 cv. Os inversores podem ser empregados de duas formas: um por terno de moenda, tipicamente em média tensão, ou um inversor para cada rolo do terno, neste caso utilizando motores e inversores em baixa tensão (CHICOA, 2017).

Figura 30 – Motores de indução trifásicos empregados no processo de extração



Fonte: (WEG, 2025).

Cabe salientar que o emprego de inversores de frequência traz como inconveniente, a geração de distorção harmônica, por não apresentarem funcionamento linear ao longo do tempo. Dentre os problemas causados pela distorção harmônica pode-se citar o aquecimento de condutores, perdas adicionais no ferro e nos enrolamentos das máquinas, além de afetar a isolação dos próprios motores, de transformadores e de equipamentos sensíveis (CHICOA, 2017).

Para se amenizar os problemas causados pelos harmônicos pode-se citar a separação de cargas em diferentes transformadores, principalmente equipamentos de características distintas e utilização de filtros de harmônicos ativos e passivos (CHICOA, 2017). Contudo, com o desenvolvimento da eletrônica de potência, os artifícios utilizados para minimização de harmônicos têm sido incorporados na própria arquitetura dos *inversores de frequência*. Pode-se citar o uso de inversores de frequência multinível, que conseguem sintetizar tensões senoidais de maneira mais satisfatória (SILVA, 2023).

3.2.10 Ganhos no uso de MITs no processo de preparo e extração

Nesta seção são descritos os ganhos obtidos ao se utilizar acionamentos elétricos em detrimento de acionamentos mecânicos, em específico para acionamento de ternos de moenda.

3.2.10.1 Escolha do MIT em função dos parâmetros da carga

Como citado anteriormente, moendas são cargas com característica de torque constante para toda a faixa de rotação. Seu tamanho, em polegadas determina a escolha de motores de indução, que podem ter potências entre 700 cv a 2500 cv, na faixa de tensão de 690 V a 6,6 kV. Para escolha do MIT, deve-se observar as especificações da moenda, como mostrado na Tabela 3, dentre estes, rotações mínima e máxima, torque de saída e torque requerido do motor e eficiência (CHICOA, 2017).

Tabela 2 – Especificações de uma moenda

Rotação mínima (<i>rpm</i>)	Rotação máxima (<i>rpm</i>)	Torque na saída (N.m)	Relação de redução	Torque do motor (N.m)
3,5	7,1 rpm	1.890.469	1:170	11120

Fonte: Adaptado de CHICOA (2017).

Com base nestes dados, pode-se calcular a potência da moenda, em cv, (1 cv equivale a 736 W) com a seguinte equação

$$P_{carga} = T_{carga} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_{carga}}{60} \right) \cdot \left(\frac{1}{736} \right), \quad (65)$$

$$P_{carga} = 1890469 \cdot \left(\frac{7,1 \cdot \pi}{30} \right) \cdot \left(\frac{1}{736} \right) = 1909 \text{ cv}. \quad (66)$$

Assim MIT escolhido deve ter pelo menos 1909 cv e possuir torque nominal de no mínimo 11120 N.m.

Multiplicando a rotação máxima da moenda, a rotação antes do redutor deve estar no intervalo entre 600 *rpm* a 1200 *rpm*. Para um motor de 60 Hz, aplicando a

equação (30) para a maior rotação, verifica-se que o MIT deve ser de 6 polos. Este cálculo é muito simplificado, é apenas o primeiro passo, devendo ser confrontada as curvas de torque *versus* velocidade da moenda e do MIT escolhido, de modo que a curva do motor deve sempre estar acima da curva da carga (CHICOA, 2017).

3.2.10.2 Eficiência de um sistema de acionamento elétrico de uma moenda

A seguir, mostra-se um estudo de caso da eletrificação de um terno de moenda em uma usina sucroalcooleira apresentado em Chicoa (2017), de modo a substituir um acionamento mecânico, com eficiência de 65%.

A instalação conta com um gerador de 25 MVA (rendimento de 97%) acoplado via redutor (rendimento de 98%) a uma turbina a vapor de 63 kgf/cm² (rendimento de 87%) sendo gerados 6 MVA e exportados 2 MVA. O terno de moenda de 78" tem potência de 1450 cv, 1.447.123,00 N.m de torque e rotação entre 3,5 *rpm* e 7,1 *rpm*.

O motor escolhido, de 60 Hz, 6 polos, tem tensão nominal de 690 V, 1600 cv de potência e torque nominal de 8350 N.m, 0,88 de fator de potência e rendimento de 96%, sendo acoplado na moenda por meio de um redutor com rendimento de 96%. Na rotação especificada de operação, 1505 *rpm*, o torque é de 4531 N.m.

Por último, foi escolhido um *inversor de frequência* de 12 pulsos (rendimento de 97% e fator de potência médio de 0,965), alimentado por um transformador de 13,8 kV/ 690 V, com eficiência de 98%. Calculando a eficiência do acionamento elétrico, multiplicando os rendimentos individuais do transformador, do inversor e do MIT, (CHICOA, 2017), tem-se

$$\eta_{ele}(\%) = (\eta_{trafo} \cdot \eta_{inversor} \cdot \eta_{MIT}). 100\% , \quad (67)$$

$$\eta_{ele} = (0,98 \cdot 0,97 \cdot 0,96). 100\% = 91,26 \% . \quad (68)$$

Para calcular a eficiência global do sistema, considerando desde a turbina, passando pelo redutor, gerador até o sistema de acionamento elétrico acoplado à moenda por outro redutor, multiplica-se os rendimentos individuais de cada componente. Assim tem-se

$$\eta_{geralEle} (\%) = (\eta_{redutor1} \cdot \eta_{turbina} \cdot \eta_{gerador} \cdot \eta_{ele} \cdot \eta_{redutor2}) \cdot 100\% , \quad (69)$$

$$\eta_{geralEle} (\%) = (0,98 \cdot 0,87 \cdot 0,97 \cdot 0,9126 \cdot 0,96) \cdot 100\% = 72,45\% . \quad (70)$$

Comparando com o rendimento global do sistema com acionamento mecânico, 65%, observa-se o ganho em eficiência proporcionado pela adoção do MIT.

Por último, Chicoa (2017) compara a potência demandada de cada sistema de acionamento. Aqui os dois sistemas são comparados supondo a rotação mínima de 3,5 *rpm*. Nesse caso, a potência requerida pela moenda é

$$P_{carga} = 1447,123 \cdot \left(\frac{3,5 \cdot \pi}{30} \right) = 530,40 \text{ kW} . \quad (71)$$

Considerando desde a entrada da turbina acoplada ao gerador até a moenda, tem-se que, as potências necessárias para o acionamento mecânico (P_{mec}) e o acionamento por MIT (P_{MIT}) são respectivamente

$$P_{mec} = \frac{P_{carga}}{\eta_{mec}} = \frac{530,40}{0,65} = 815,98 \text{ kW} , \quad (72)$$

$$P_{MIT} = \frac{P_{carga}}{\eta_{geralEle}} = \frac{530,40}{0,7245} = 732,09 \text{ kW} . \quad (73)$$

Encontrando a diferença, tem-se que acionamento elétrico empregando MIT proporciona um excedente de potência de 83,91 KW. Essa diferença de potência pode ser direcionada para a geração de excedentes energia elétrica, justificando assim a substituição do acionamento mecânico.

4 GERAÇÃO DE VAPOR E ENERGIA ELÉTRICA

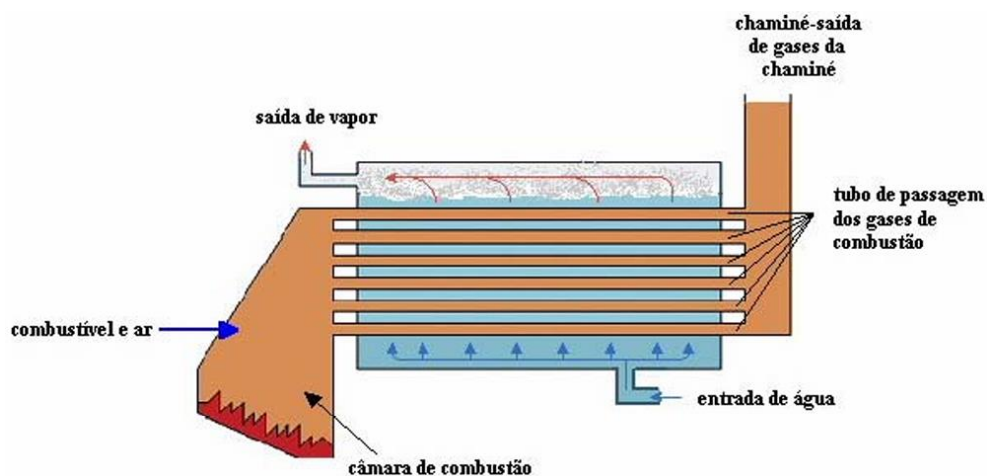
Nesta seção, são apresentados os principais equipamentos utilizados na geração de vapor e energia elétrica em uma usina de açúcar e álcool. Primeiro são mostrados os tipos básicos de caldeiras e turbinas a vapor. Por fim são expostos os princípios teóricos dos geradores síncronos.

4.1 CALDEIRAS

As caldeiras são equipamentos projetados para geração de vapor a partir do calor da queima de algum combustível, no caso o bagaço de cana-de-açúcar (SOUZA, 2024). Podem ser classificadas em *flamotubulares* ou *aquatubulares*, conforme o modo de transferência de calor para vaporizar a água (PAZIAN, 2004).

As caldeiras *flamotubulares* são projetadas de modo que os gases quentes oriundos da combustão, circulem no interior de tubos imersos em um reservatório de água. O calor dos gases aquece as paredes dos tubos, que por sua vez aquece a água para produção de vapor, conforme ilustrado na Figura 31. Devido à necessidade de se aumentar a pressão e vazão do vapor produzido (PAZIAN, 2004), esse tipo de caldeira foi substituído pelas usinas de açúcar nas décadas de 1930 e 1940 por caldeiras *aquatubulares* (PERES, 1982 *apud* PAZIAN, 2004).

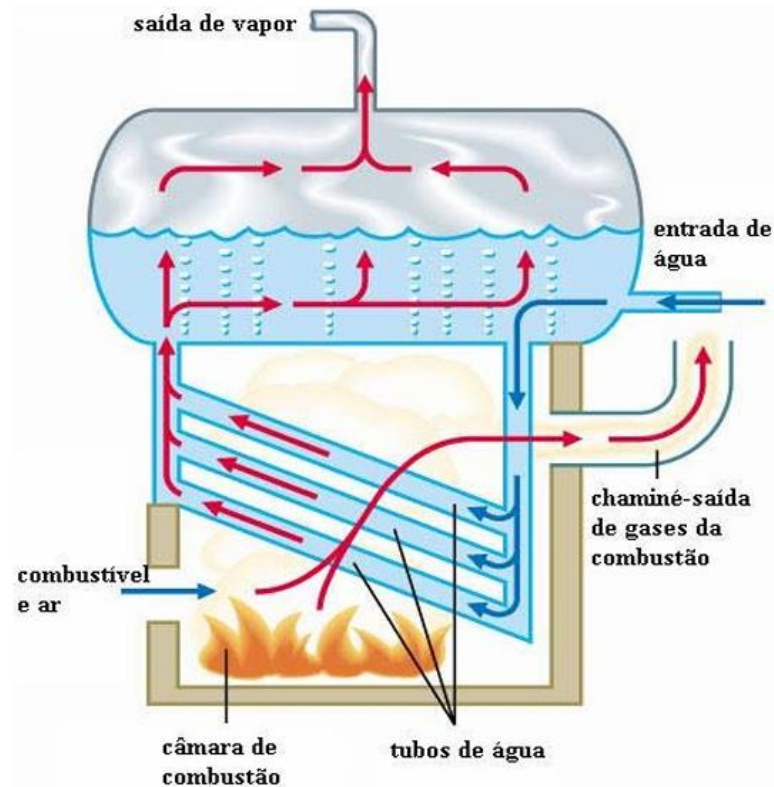
Figura 31 – Diagrama simplificado de uma caldeira *flamotubular*



Fonte: (PAZIAN, 2004).

As caldeiras *aquatubulares* funcionam de maneira oposta, ou seja, os gases quentes da combustão envolvem tubos por onde circula água. A água em contato com os tubos, é aquecida a uma temperatura tal que permite a produção de vapor (PAZIAN, 2004), conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Diagrama simplificado de uma caldeira *aquatubular*



Fonte: (PAZIAN, 2004).

Em sua maioria, as caldeiras *aquatubulares* instaladas atualmente nas usinas de açúcar e álcool, funcionam com vapor a uma pressão de 20,6 *bar* e temperatura de 300° C, atingindo rendimentos entre 80% e 85%. Olhando para as caldeiras *aquatubulares* de fabricação nacional, pode-se encontrar modelos que alcançam rendimentos de até 87,5% e são capazes de produzir de 100 a 300 toneladas de vapor por hora, operando com pressões que variam de 20,6 a 78,5 *bar* e temperaturas entre 300 e 510° C (PERA, 1990, *apud* PAZIAN, 2004).

Pode-se ainda classificar as caldeiras pelo tipo de queima do combustível: por deposição ou suspensão. Na queima por deposição, o combustível, no caso a biomassa proveniente do processo de extração, é depositado de forma cônica sobre um grelhado fixo, onde recebe injeção de ar e entra em combustão. Por sua vez, na

queima por suspensão, a biomassa é introduzida na câmara de combustão da caldeira por injetores pneumáticos e entra em combustão sem atingir o grelhado, o que permite às caldeiras apresentarem rendimentos entre 85% e 87% (CAMPARINI, 2002, *apud* PAZIAN, 2004).

As caldeiras ainda podem contar com sistemas de recuperação da energia térmica dos gases de combustão, que permitem atingir maiores níveis de eficiência (PAZIAN, 2004).

Um desses equipamentos é o *superaquecedor*, que é um trocador de calor instalado no circuito dos gases quentes da caldeira. Dentro da caldeira, o vapor permanece em equilíbrio com a fase líquida, constituindo o chamado *vapor saturado*, que ao passar pelo *superaquecedor*, eleva sua temperatura e passa a ser denominado de *vapor super-aquecido*. Destaca-se como vantagem desse sistema, a elevação do rendimento que pode ser elevada em 3% a cada 37% de elevação da temperatura do vapor (PERA, 1990, *apud* PAZIAN, 2004) além de permitir maior rendimento às turbinas a vapor e evitar danos aos rotores destas devido à sua isenção de umidade (MACINTYRE, 1997 *apud* PAZIAN, 2004).

Outro recurso de recuperação de calor é o chamado *economizador*, um trocador de calor que tem como função elevar a temperatura da água de alimentação, por meio da energia térmica ainda presente nos gases na saída da caldeira (PAZIAN, 2004). Seu uso pode trazer uma economia de combustível de 1,4% para cada 10° C de aumento da temperatura da água (PERES, 1982 *apud* PAZIAN, 2004).

Por último, tem-se um trocador de calor chamado de *pré aquecedor de ar*, que aproveita o calor residual dos gases para aquecer o ar a ser utilizado na queima do combustível (PAZIAN, 2014). Seu uso pode elevar a eficiência da caldeira em 2% para cada incremento de 38° C na temperatura do ar (PERES, 1982 *apud* PAZIAN, 2004).

4.2 TURBINAS A VAPOR

Uma turbina a vapor, é uma máquina motriz que utiliza a energia cinética do vapor expandido para imprimir força sobre paletas em um rotor de modo que este possa girar. Dentro de uma indústria, são utilizados nos mais diversos equipamentos, desde os acionamentos mecânicos até em turbogeradores, ((MACINTYRE, 1997 *apud* PAZIAN, 2004) foco desta seção. Turbinas a vapor podem ser classificadas conforme

o modo de ação do vapor sobre as paletas, o vapor de escape e o número de estágios (PAZIAN, 2004).

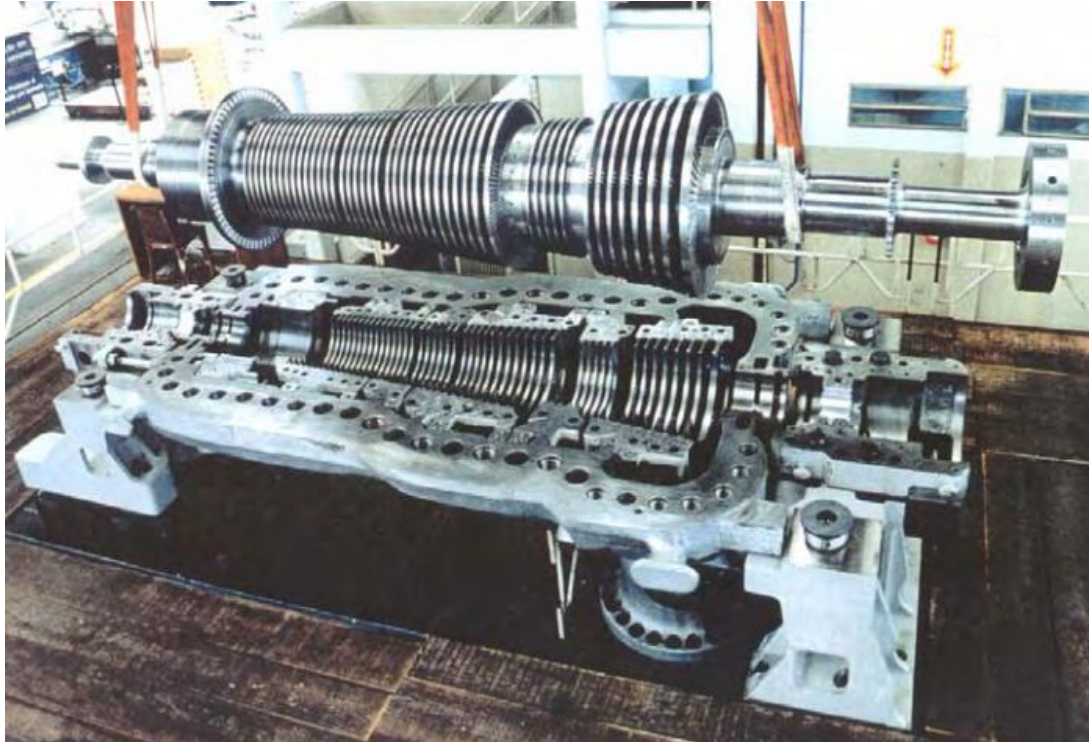
Com relação ao modo de ação do vapor sobre as paletas do rotor, as turbinas a vapor se dividem em turbinas de *ação* e turbinas de *reação*. Em turbinas de *ação*, toda a queda de pressão do vapor acontece antes dele atingir as pás do rotor. A energia de pressão é completamente transformada em energia cinética em bocais estacionários, não havendo variação de pressão ao longo do rotor. Já em turbinas a vapor de *reação*, o vapor se expande e perde pressão continuamente, tanto nos componentes fixos quanto nas próprias pás do rotor (SOUZA, 2024).

Já com relação à pressão de escape do vapor, pode-se dividir as turbinas a vapor em dois tipos: de *contra-pressão* e de *condensação*. Em turbinas a vapor de *contra-pressão*, a pressão do vapor de escape é maior do que a pressão atmosférica, sendo o vapor utilizado como fonte de calor, como no caso de usinas de açúcar e álcool. Em contrapartida, turbinas a vapor de *condensação*, tem pressão de vapor de escape, abaixo da pressão atmosférica por meio do uso de um condensador em sua saída. Dessa maneira, por usar melhor a energia térmica do vapor, são utilizadas em instalações que não demandam calor de processo (PAZIAN, 2004).

Por fim, com relação ao número de estágio, as turbinas a vapor podem ser de *mono-estágio* ou *multi-estágios*. Turbinas *mono-estágio*, são compostas basicamente de um rotor com paletas, que gira sobre mancais por meio da energia cinética do vapor vindo de bocais localizados no estator da turbina. Este tipo de turbina a vapor tem como desvantagem a baixa eficiência, podendo ser inferior a 50% (PAZIAN, 2004).

Já turbinas a vapor *multi-estágio* têm mais de um estágio, podendo variar tipicamente de 4 a 40, sendo os dois primeiros de *ação* e os seguintes de *reação*. São equipamentos de concepção mais elaborada, podendo alcançar eficiências de até 85%, além de trabalharem com pressões de vapor maiores do que 98,07 bar (PAZIAN, 2004). Na Figura 33 é mostra-se uma turbina a vapor *multi-estágio* com o rotor exposto.

Figura 33 – Turbina a vapor *multi-estágios* com rotor exposto



Fonte: (PAZIAN, 2004).

Turbinas a vapor *multi-estágios* podem possuir uma ou mais extrações de vapor a pressões diferentes entre a pressão de entrada e a de saída. Este tipo de turbina a vapor pode ser útil em processos que necessitem de dois ou mais níveis de pressão, como nos casos em que se utilizam acionamentos mecânicos de moendas por exemplo (PAZIAN, 2004).

4.3 GERADORES SÍNCRONOS

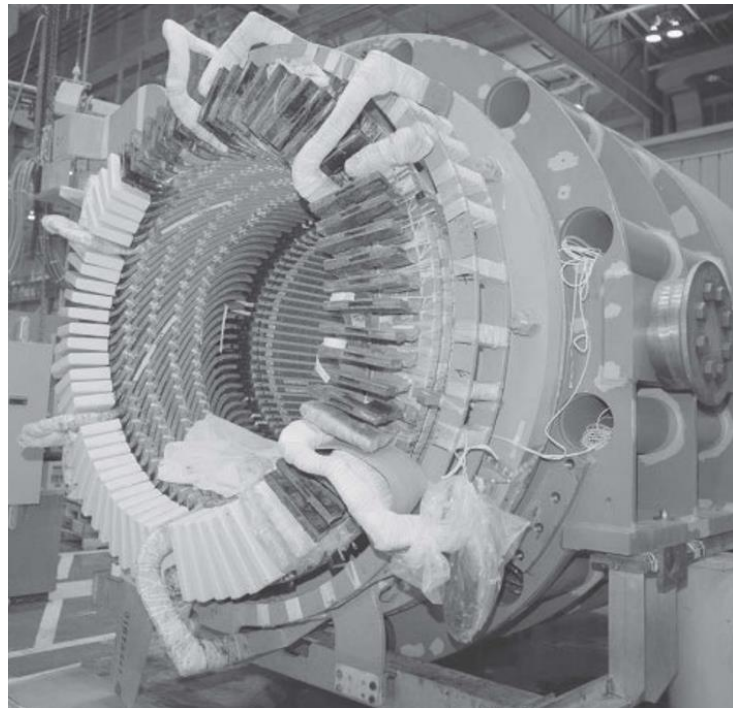
Nesta seção são apresentados os princípios teóricos dos geradores síncronos, utilizados nas usinas de açúcar e álcool.

4.3.1 Características construtivas dos geradores síncronos

Um gerador síncrono é uma máquina elétrica rotativa que converte energia mecânica em energia elétrica alternada. A corrente CC no enrolamento do rotor, gera

um campo magnético que induz uma tensão alternada no estator, mostrado na Figura 34, cuja frequência de saída está vinculada a velocidade de rotação do eixo do rotor (CHAPMAN, 2013). De maneira semelhante aos motores de indução, os geradores síncronos têm seus estatores e rotores compostos por finas chapas de material ferromagnético isoladas entre si, de modo a evitar a circulação de correntes parasitas (UMANS, 2014).

Figura 34 – Estator de um gerador síncrono

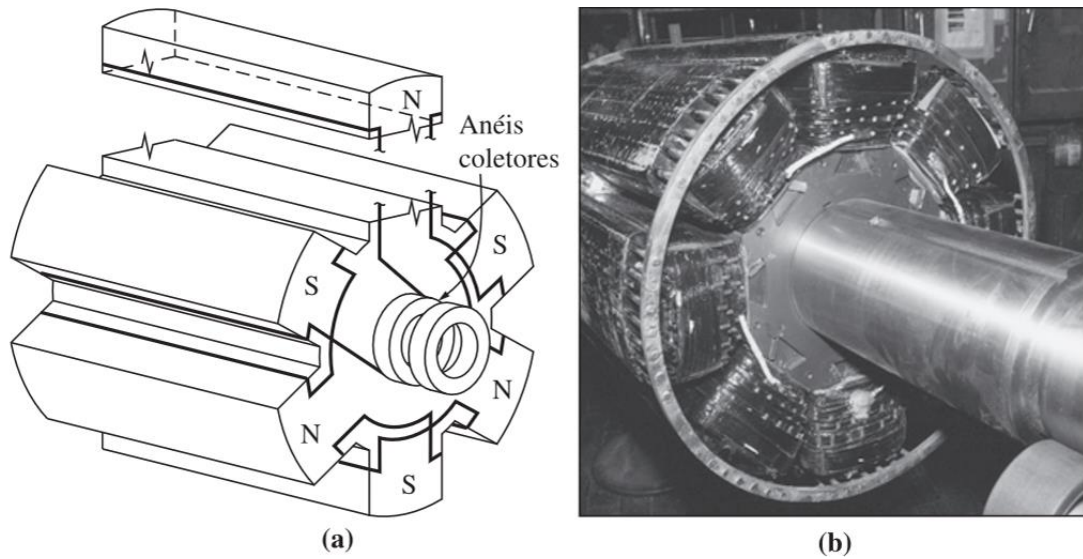


Fonte: (UMANS, 2014).

O *enrolamento de armadura*, constituído de uma bobina com N espiras, está alojado em ranhuras no estator. Assim como no caso dos motores de indução, a distribuição das bobinas em ranhuras, tem o objetivo de diminuir o conteúdo harmônico (UMANS, 2014).

O rotor de um gerador síncrono, que pode ser entendido como um grande eletroímã (inclusive ser constituído de um ímã permanente), abriga o *enrolamento de campo*, sendo construído de duas formas distintas: rotor *de polos salientes* e de *polos não-salientes*. O rotor de *polos salientes*, ilustrado na Figura 35-a e com modelo real na Figura 35-b, forma protuberâncias, onde estão alojadas as bobinas do *enrolamento de campo* (CHAPMAN, 2013).

Figura 35 – Ilustração (a) e modelo real (b) de um rotor de *polos salientes*



Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013).

Por outro lado, em um rotor de polos *não-salientes*, mostrado na Figura 36, o *enrolamento de campo*, está alojado em ranhuras de forma semelhante ao *enrolamento de armadura*.

Figura 36 – Rotor de *polos não-salientes*



Fonte: (UMANS, 2014).

Quanto à escolha de projeto desses dois tipos de rotores, depende da característica de velocidade da forma motriz mecânica que movimenta o rotor. Rotores de *polos salientes*, são tipicamente utilizados em hidrelétricas, pois operam em baixas velocidades e maior número de polos para a frequência desejada. Já rotores de polos

não-salientes, são tipicamente empregados em turbogeradores, caso dos geradores utilizados em usinas de açúcar e álcool, e por operarem com altas velocidades, necessitam de menor número de polos (UMANS, 2014).

Uma característica importante com relação aos rotores, é a forma de alimentação da corrente CC nos enrolamentos de campo presentes no rotor, sendo basicamente de dois tipos: utilizando uma fonte CC externa ou interna ao gerador (CHAPMAN, 2013).

A utilização de uma fonte externa CC para o fornecimento da corrente de campo, requer o uso de anéis coletores (ou deslizantes) e escovas. Os anéis são isolados e fixados ao eixo, e as escovas, feitas de carbono, mantêm contato constante com eles de modo a transferir a tensão CC para o enrolamento de campo, independentemente da rotação. Embora esse método seja amplamente utilizado em máquinas de pequeno porte por ser o mais econômico, ele apresenta desvantagens como o atrito entre as escovas e os anéis, o que exige manutenção regular para verificar o desgaste das escovas (CHAPMAN, 2013).

Geradores síncronos de grande porte utilizam fontes CC internas para fornecer a corrente contínua ao *enrolamento de campo* do rotor. Esse sistema funciona como um pequeno gerador CA (*excitatriz*) acoplado ao eixo do gerador principal, como mostrado na Figura 37, sendo que o *enrolamento de campo* fica no estator e o *enrolamento de armadura* no eixo do rotor.

Figura 37 – Gerador síncrono com sistema de excitação sem escovas



Fonte: Adaptado de WEG (2025).

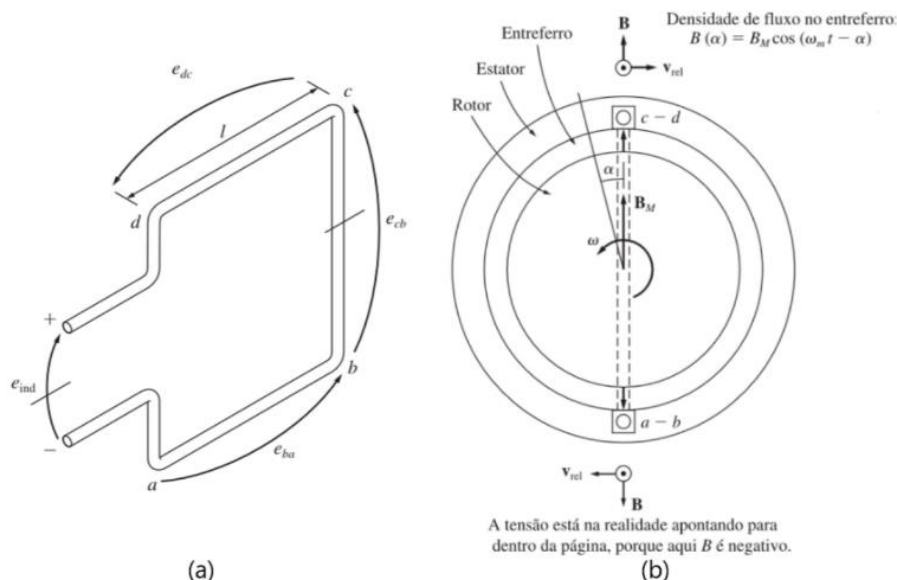
A saída de corrente alternada (CA) desse gerador (*excitatriz*) é retificada por diodos montados na própria estrutura do rotor, gerando assim a corrente contínua para o *enrolamento de campo* da máquina principal. A grande vantagem desse sistema é que, ao controlar a baixa corrente do campo da *excitatriz*, é possível ajustar a corrente de campo da máquina principal sem usar escovas ou anéis coletores, (*brushless*), reduzindo a necessidade de manutenção (CHAPMAN, 2013).

No sistema de excitação sem escovas, a única fonte de alimentação elétrica externa ao gerador principal é a fonte CC que alimenta os enrolamentos de campo da *excitatriz* (CHAPMAN, 2013).

4.3.2 Tensão induzida no estator por uma espira girante

Esta seção, apresenta como o campo magnético do rotor induz tensão nos terminais de uma bobina, ilustrada na Figura 38-a, no estator de um gerador síncrono, como mostrado na Figura 38-b.

Figura 38 – Bobina de um estator (a) sob a ação de um campo magnético do rotor em um gerador síncrono monofásico (b)



Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013).

Como o rotor é alimentado com corrente contínua (CC), o campo (B) é estacionário, com distribuição aqui considerada perfeitamente senoidal.

Como o rotor gira com velocidade angular mecânica, ω_m , tem-se que

$$B(\alpha) = B_M \cdot \cos(\omega_m t - \alpha) . \quad (74)$$

sendo α , um ângulo medido a partir de B_M , que é o máximo valor de B .

Da equação (31), tem-se que nos terminais de um condutor em movimento em um campo magnético externo, aparece uma tensão induzida. No entanto, em um gerador síncrono, o condutor está parado e o campo magnético está em movimento. Assim como no caso do MIT, para aplicar a mesma equação, é necessário adotar um referencial onde o campo magnético parece estacionário (CHAPMAN, 2013). Dessa forma, a tensão induzida nos segmentos a-b, c-b e d-c da bobina são respectivamente

$$e_{ab} = -v \cdot B_M \cdot l \cdot \cos(\omega_m t - 180^\circ) , \quad (75)$$

$$e_{dc} = -v \cdot B_M \cdot l \cdot \cos(\omega_m t) , \quad (76)$$

$$e_{cb} = 0 . \quad (77)$$

Pode-se observar que no segmento c-b a tensão induzida é nula, pois $v \times B$ é perpendicular a l .

Pode-se demonstrar que ϕ e v são respectivamente

$$\phi = 2 \cdot r \cdot l \cdot B_M , \quad (78)$$

$$v = r \cdot \omega_m . \quad (79)$$

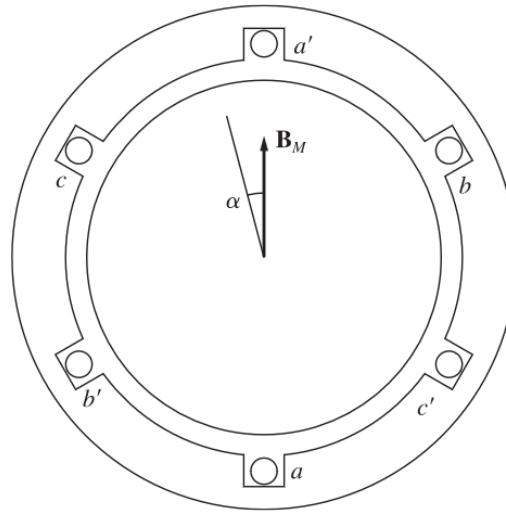
Desse modo, a tensão induzida é

$$e_{ind} = e_{da} = N \cdot \phi \cdot \omega_m \cdot \cos(\omega_m t) , \quad (80)$$

sendo N o número de espiras da bobina do estator.

Para o caso de um gerador síncrono de dois polos e 3 fases separadas no estator em 120° mecânicos, como mostrado na Figura 39, as tensões induzidas em cada fase são defasadas em 120° elétricos uma da outra.

Figura 39 – Vista frontal simplificada de um gerador síncrono trifásico de dois polos e enrolamentos concentrados



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Para as fases a, b e c, as tensões induzidas são

$$e_{aa'} = N \cdot \phi \cdot \omega_m \cdot \cos(\omega_m t) , \quad (81)$$

$$e_{bb'} = N \cdot \phi \cdot \omega_m \cdot \cos(\omega_m t - 120^\circ) , \quad (82)$$

$$e_{cc'} = N \cdot \phi \cdot \omega_m \cdot \cos(\omega_m t + 120^\circ) . \quad (83)$$

Finalmente, a tensão eficaz, RMS, de cada uma das fases do estator do gerador trifásico é dada por

$$E_A = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot \phi . \quad (84)$$

A tensão E_A em cada fase depende ainda se as fases do estator estão ligadas em Y ou Δ . Se a ligação for Y, basta multiplicar por $\sqrt{3}$ e se for Δ é simplesmente E_A (CHAPMAN, 2013).

4.3.3 Circuito equivalente de um gerador síncrono

A tensão E_A encontrada anteriormente não necessariamente se constitui na tensão nos terminais do gerador (V_ϕ) fato que só ocorre quando não há carga conectada. Isso pode ocorrer por diversos fatores como distorção do campo do rotor pela ação das correntes de carga, chamado de *reação de armadura*, a auto indutância e a resistência dos enrolamentos do estator, além do efeito da não uniformidade do entreferro, no caso de geradores com rotor de *polos salientes* (CHAPMAN, 2013).

Nesta análise, são desconsiderados os efeitos dos *polos salientes*, focando-se nos geradores de polos *não-salientes*. Iniciando a análise, considera-se que o gerador síncrono trifásico, como mostra o corte frontal simplificado da Figura 40-a, não alimenta nenhuma carga. Nesse caso, a corrente no rotor produz o campo $\mathbf{B}_R$, com distribuição senoidal ao longo do entreferro. Esse campo induz uma tensão $\mathbf{E}_A$ com valor de pico em fase com o campo do rotor. Como mostrado na Figura 40-b, o gerador passa a alimentar uma carga indutiva, o que faz surgir uma corrente ($\mathbf{I}_A$) atrasada da tensão $\mathbf{E}_A$. Essa corrente produz seu próprio campo magnético ($\mathbf{B}_S$) como mostrado na Figura 40-c (CHAPMAN, 2013).

O campo do rotor se soma ao do estator, o que distorce este último e resulta no campo líquido ($\mathbf{B}_{liq}$) a um certo ângulo de $\mathbf{B}_R$, como pode ser observado na Figura 40-d. O campo $\mathbf{B}_S$ faz surgir uma nova tensão $\mathbf{E}_{est}$, atrasada da tensão interna ($\mathbf{E}_A$) a qual é somada (CHAPMAN, 2013), resultando em

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A + \mathbf{E}_{est} , \quad (85)$$

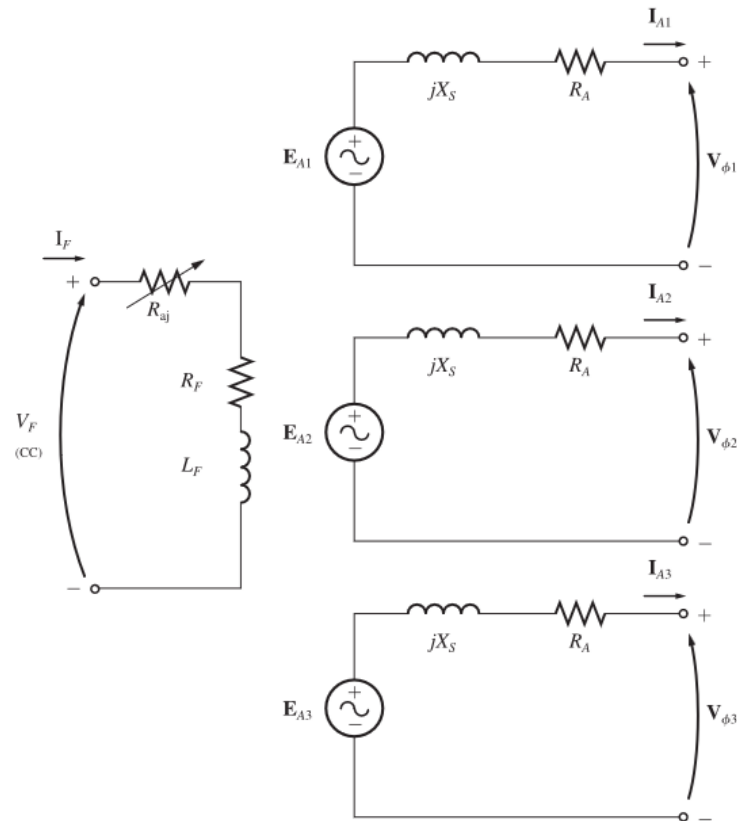
sendo $\mathbf{V}_\phi$ a tensão terminal do gerador.

Se X for uma certa constante de proporcionalidade, então pode-se escrever a tensão $\mathbf{E}_{est}$ como

$$\mathbf{E}_{est} = -jX \cdot \mathbf{I}_A . \quad (86)$$

Com isso pode-se construir o circuito equivalente do gerador síncrono trifásico, mostrado na Figura 41.

Figura 41 – Circuito equivalente de um gerador síncrono trifásico

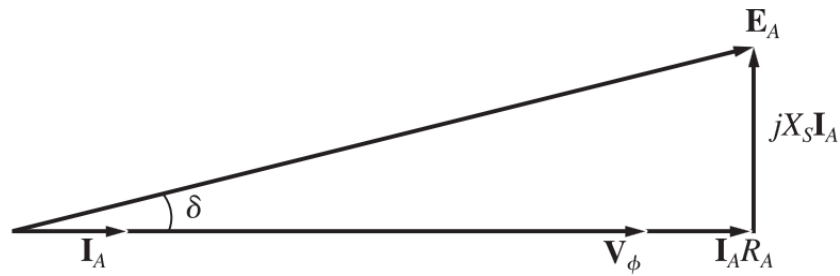


Fonte: (CHAPMAN, 2013).

É possível observar na Figura 41, além dos circuitos das três fases, com tensões de módulo igual (apenas se a carga alimentada for equilibrada) e defasadas em 120° uma da outra, o circuito do rotor, com alimentação em corrente contínua regulada por um resistor de ajuste (R_{aj}) (CHAPMAN, 2013).

Como as tensões em um gerador síncrono são CA, elas podem ser expressas graficamente como *fasores*. A Figura 42 mostra o *diagrama fasorial* para o caso do gerador alimentando uma carga puramente resistiva.

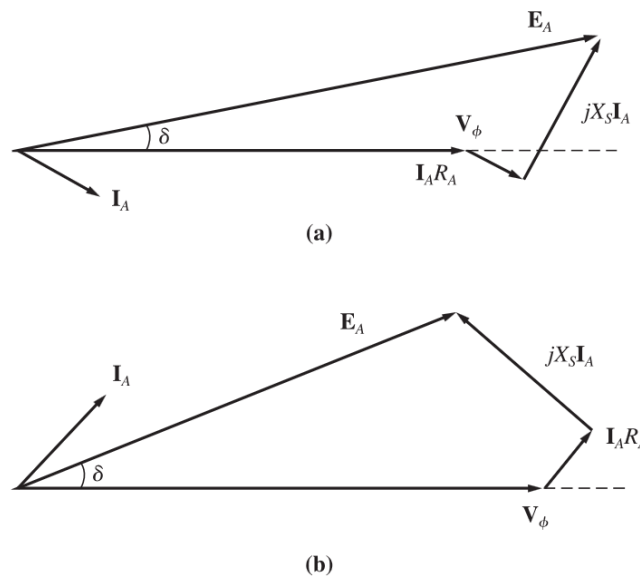
Figura 42 – *Diagrama fasorial* de um gerador síncrono com carga resistiva



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Pode-se notar que a todas as tensões usam como referência a tensão terminal V_ϕ . Na Figura 43-a ilustra-se o *diagrama fasorial* para uma carga com característica indutiva e a Figura 43-b mostra-se o *diagrama fasorial* para uma carga com característica capacitiva.

Figura 43 – *Diagrama fasorial* de um gerador síncrono com carga indutiva (a) e com carga capacitiva (b)



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Analisando as duas situações com cargas reativas, pode-se verificar que para uma determinada tensão de fase (V_ϕ) e uma determinada corrente de armadura (I_A) é necessária uma maior tensão interna (E_A) para uma carga indutiva do que para uma carga capacitiva. Dessa maneira deduz-se, da equação (84), que para se obter a mesma tensão terminal, é necessária uma maior corrente de campo para cargas indutivas (CHAPMAN, 2013).

4.3.4 Torque e potência em geradores síncronos

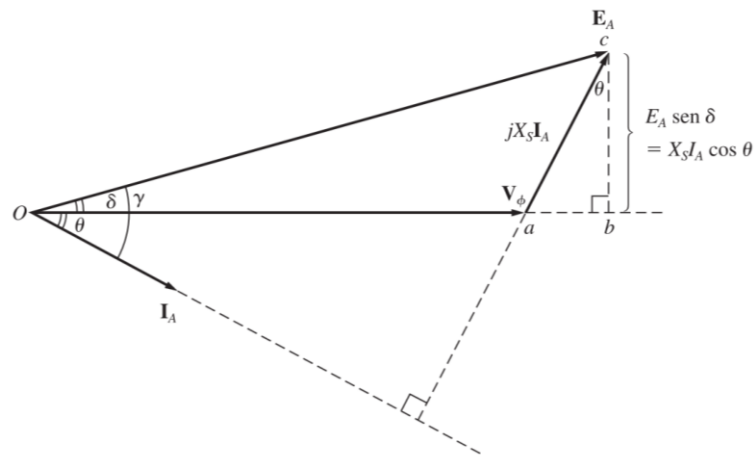
Assim como um MIT, um gerador síncrono apresenta perdas de potência desde a sua entrada, sendo a potência de entrada, o produto entre o torque aplicado pela força motriz e a velocidade angular de rotação do eixo, que deve ser constante para não haver variações na frequência elétrica (CHAPMAN, 2013). Na saída, em termos de grandezas de fase, as potências, ativa e reativa, são respectivamente

$$P_{saída} = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_A \cdot \cos(\theta) , \quad (90)$$

$$Q_{saída} = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_A \cdot \sin(\theta) . \quad (91)$$

Como $X_S \gg R_A$, pode-se suprimir a resistência de armadura sem grandes prejuízos, o que resulta no *diagrama fasorial* mostrado na Figura 44.

Figura 44 – *Diagrama fasorial* de um gerador síncrono desprezando a resistência de armadura



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Na Figura 44, o segmento a-b pode ser expresso como

$$E_A \sin(\delta) = X_S \cdot I_A \cdot \cos(\theta) . \quad (92)$$

Isolando $I_A \cos(\theta)$ e substituindo na equação (90) tem-se que a potência ativa entregue por um gerador síncrono de polos *não-salientes* é

$$P_{saída} = \frac{3 \cdot V_{\phi} \cdot E_A}{X_S} \text{sen}(\delta) . \quad (93)$$

Dessa forma, para o torque, pode-se escrever

$$T_{ind} = \frac{3 \cdot V_{\phi} \cdot E_A}{\omega_m \cdot X_S} \text{sen}(\delta) . \quad (94)$$

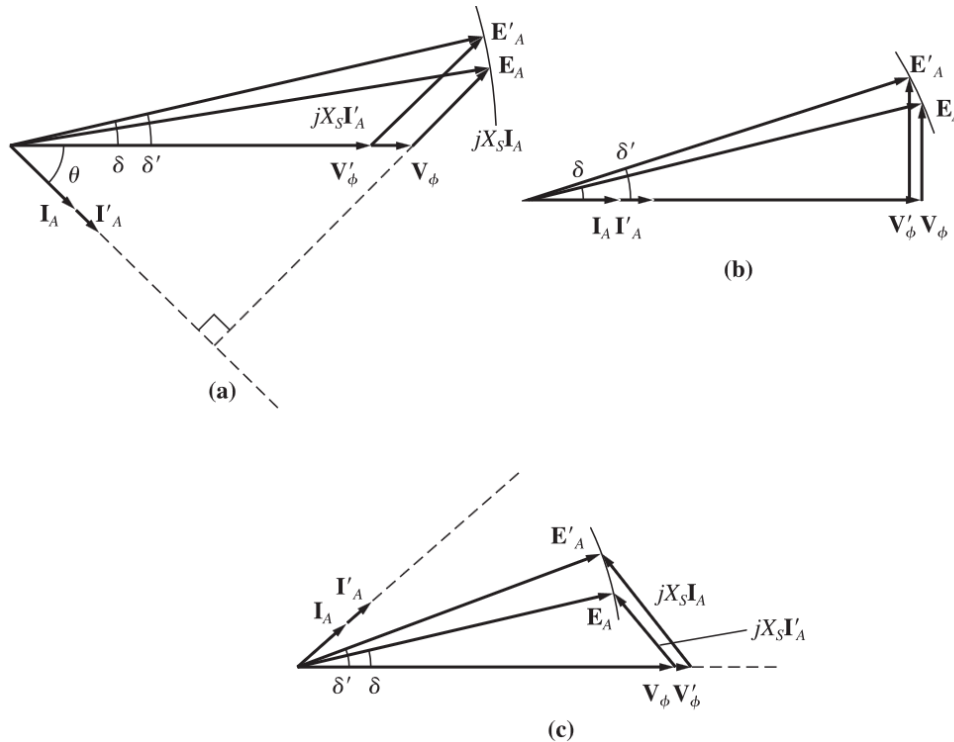
Verifica-se, na equação (93), que a potência depende diretamente do seno do ângulo entre V_{ϕ} e E_A . Este ângulo é conhecido como *ângulo de torque do gerador*. Assim, a máxima potência de saída do gerador tem $\delta = 90^\circ$, sendo essa potência denominada *limite de estabilidade estática* do gerador (CHAPMAN, 2013).

4.3.5 Gerador operando isolado

Para se estudar o comportamento do gerador síncrono operando isolado, alimentando uma determinada carga, considera-se que os efeitos de R_A sejam desprezíveis além da velocidade de rotação e o fluxo magnético do rotor serem constantes (CHAPMAN, 2013).

Inicialmente o gerador alimenta uma carga com característica indutiva e deseja-se saber o comportamento da tensão terminal. Um aumento dessa mesma carga, sem alterar seu fator de potência, implica em uma diminuição da tensão terminal (V_{ϕ}) como pode ser visto no *diagrama fasorial* mostrado na Figura 45-a. Isso se deve ao fato de que o fluxo e a velocidade de rotação são mantidos constantes, o que não permite a alteração de E_A .

Figura 45 – *Diagramas fasoriais* mostrando o efeito do incremento de carga indutiva (a), puramente resistiva (b) e capacitiva (c), sobre a tensão V_ϕ



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Agora, suponha-se que o gerador alimenta uma carga puramente resistiva. O aumento dessa carga, sem alterar seu fator de potência (unitário), resulta em uma pequena queda da tensão terminal, como pode ser visto na Figura 45-b. Nota-se que para um mesmo ângulo de carga, a queda de tensão neste caso é menor do que com a carga indutiva. Finalmente, tem-se o gerador alimentando uma carga com característica capacitiva que, ao ser incrementada sem alteração de seu fator de potência, implica em um aumento na tensão terminal, como ilustrado na Figura 45-c (CHAPMAN, 2013).

Cada gerador síncrono, de acordo com suas características, responderá diferente com relação à variação da tensão terminal em virtude do incremento de carga. Para se comparar geradores com relação a essa característica, se utiliza a regulação de tensão que é definida por

$$RT = \left(\frac{V_{vz} - V_{pc}}{V_{pc}} \right) \cdot 100\% , \quad (95)$$

sendo V_{vz} a tensão terminal a vazio (sem carga) e V_{pc} a tensão terminal a plena carga (CHAPMAN, 2013).

Na prática, para se manter a tensão terminal sem grandes alterações após uma variação de carga maior, como é o caso das cargas reativas, é necessário alterar proporcionalmente a tensão E_A por meio do aumento do fluxo magnético do rotor que é função da corrente de campo (CHAPMAN, 2013).

Também pode-se verificar que a velocidade de rotação diminui com o aumento da demanda por potência ativa, sendo que essa diminuição é compensada por reguladores de velocidade. Com a diminuição da velocidade, antes da ação do regulador, a tensão interna tende a diminuir pela queda da frequência, o que gera uma queda na tensão terminal e na potência ativa fornecida. A queda de velocidade é dada por

$$QV = \left(\frac{n_{vz} - n_{pc}}{n_{pc}} \right) \cdot 100\% , \quad (96)$$

sendo n_{vz} a velocidade a vazio e n_{pc} a velocidade a plena carga da máquina motriz acoplada ao gerador (CHAPMAN, 2013).

Dessa forma conclui-se que, quando um gerador opera isoladamente, a potência ativa e reativa que este entrega, depende da demanda das cargas. Com a variação das cargas, o controle de velocidade ajusta a frequência e o controle da corrente de campo, ajusta a tensão terminal.

4.3.6 Gerador operando em paralelo

Nesta seção são apresentados os requisitos para se colocar um gerador síncrono em paralelo com outro gerador ou um sistema elétrico, além de se mostrar as relações entre P e Q com a frequência e a tensão terminal.

4.3.6.1 Paralelismo entre geradores síncronos

Na prática é muito difícil se utilizar um gerador funcionando sozinho, sendo comum se operar mais de um simultaneamente em paralelo, como no caso de um grande sistema de energia. Ganha-se com isso vantagens como a maior confiabilidade, pois, em caso de falha ou retirada de uma unidade para manutenção, o fornecimento de energia elétrica não é significativamente afetado (CHAPMAN, 2013).

Supondo um gerador G_1 em operação e queira se conectar em paralelo a este, um gerador G_2 . Se a chave for fechada arbitrariamente, poderá causar sérios danos a ambos os geradores. O procedimento correto antes de se fechar a chave, consiste em se verificar certas *condições de paralelismo* (CHAPMAN, 2013).

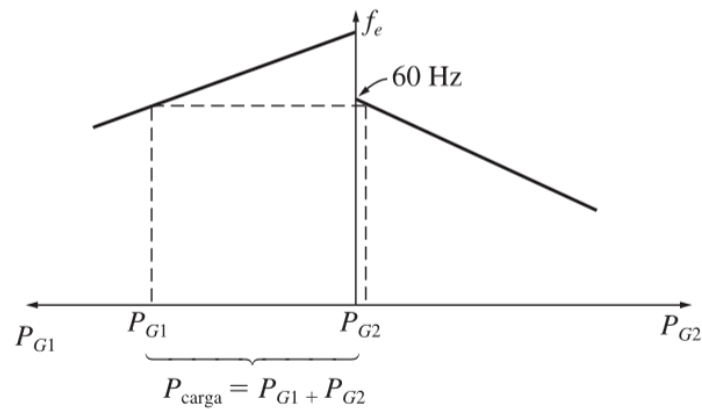
Primeiramente, deve-se atestar que a *tensão de G_2 seja igual à tensão de G_1* . Feito isso, deve-se verificar se a *sequência de fase* do gerador que se está tentando colocar em paralelo seja a mesma do gerador já em operação, garantindo que as tensões de fase dos dois geradores passem por um pico no mesmo instante. Logo em seguida, deve-se ajustar a *frequência do gerador G_2 para que seja ligeiramente superior a frequência de G_1* . Por último, deve-se *verificar se o ângulo de fase das tensões de ambos os geradores é o mesmo*. De modo geral, colocar um gerador em paralelo com outro(s) emprega um sistema automatizado (CHAPMAN, 2013).

Para ilustrar o paralelismo, supõe-se dois geradores de mesmo porte, G_1 e G_2 ligados em paralelo. Nesse caso, as somas das potências ativa, P_{G_1} e P_{G_2} , e reativa, Q_{G_1} e Q_{G_2} , de ambos deve ser igual à potência total demandada pela carga, P_{carga} e Q_{carga} (CHAPMAN, 2013).

Primeiramente, considera-se que G_1 e G_2 estejam fornecendo determinada quantidade de potência ativa a 60 Hz, como ilustrado na Figura 46, e queira se elevar a referência de velocidade no regulador de G_2 .

Para que a potência fornecida às cargas seja mantida sem alteração, a frequência de operação comum dos dois geradores aumenta, de modo que a parcela de potência fornecida à carga de G_2 aumenta enquanto a de G_1 diminui, como mostrado no diagrama potência *versus* frequência da Figura 47-a.

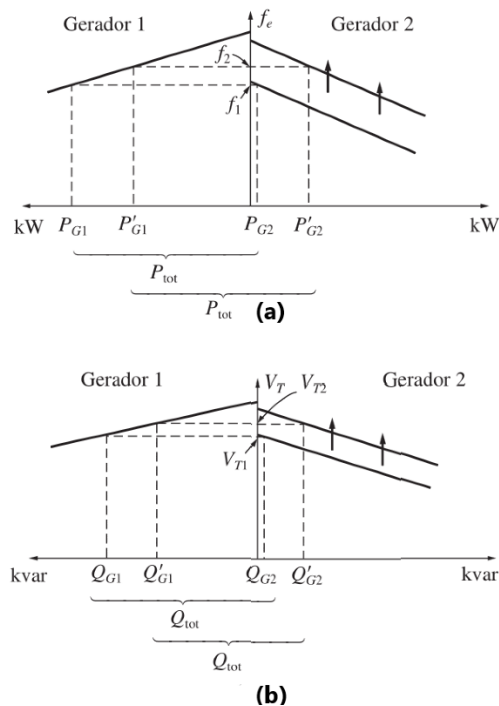
Figura 46 – Frequência versus potência de dois geradores em paralelo com suas respectivas contribuições à demanda de carga



Fonte: Adaptado de CHAPMAN (2013).

Supondo novamente a situação da Figura 46, agora se decide aumentar a corrente de campo (I_f) de G_2 . Nesse caso, o que se observa é um aumento da tensão terminal comum (V_T) que os dois fornecem às cargas, de modo que a parcela de potência reativa fornecida à carga de G_2 aumenta enquanto a de G_1 diminui, como mostrado no diagrama potência reativa *versus* tensão da Figura 47-b.

Figura 47 – P versus f para um incremento da referência de velocidade de G_1 (a) e Q versus V_T para uma elevação de I_f em G_2 (b)



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Das análises anteriores, constata-se que alterar os parâmetros de um gerador, implica em alterar os parâmetros de potência, tensão e frequência de ambos. Para que isso não ocorra, é necessário que sejam realizados ajustes simultâneos em ambos os geradores.

Desse modo, caso se queira alterar a parcela de potência ativa de ambos os geradores sem que se altere a frequência, deve-se aumentar o ajuste de velocidade de um e diminuir no outro. O mesmo vale para a potência reativa, sendo que o aumento da corrente de campo de um gerador deve ser compensado pela diminuição dessa corrente no outro gerador, de modo a manter a tensão inalterada (CHAPMAN, 2013).

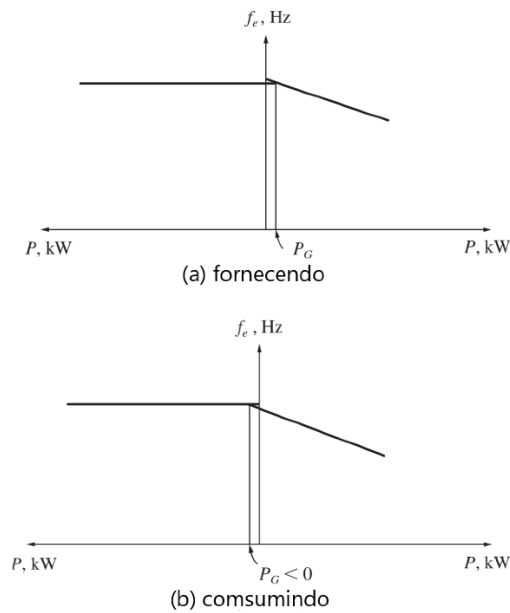
4.3.6.2 Geradores síncronos em paralelo com um *barramento infinito*

Normalmente, geradores são conectados a sistemas de potência, como é o caso dos geradores nas usinas de açúcar e álcool interligadas ao SIN. Esse sistema é tão grande, que um único gerador não consegue alterar sua frequência e sua tensão. Normalmente se utiliza o conceito de *barramento infinito* para denominar esse tipo de sistema, em que todos os geradores ligados em paralelo, devem ter a mesma frequência e tensão (CHAPMAN, 2014).

Para se compreender como se comporta um gerador conectado a esse sistema, assume-se que a máquina motriz do gerador tem um controle de velocidade automático e a corrente de campo é ajustada manualmente.

Imediatamente após o gerador entrar em paralelo com o *barramento infinito*, diz-se que o gerador está “flutuando” na rede, fornecendo uma pequena quantidade de potência ativa e pouca ou nenhuma potência reativa. Isso se deve ao fato de que, no momento do sincronismo, sua frequência a vazio é ligeiramente maior do que a frequência do barramento, tornando a potência positiva, como pode ser visualizado na Figura 48-a. Se a frequência do gerador for menor do que a frequência do barramento, após a conexão com a rede o gerador passa a consumir potência, como pode ser visto na Figura 48-b. Na prática, é comum que geradores tenham um sistema de proteção, em caso de inversão do fluxo de potência (CHAPMAN, 2013).

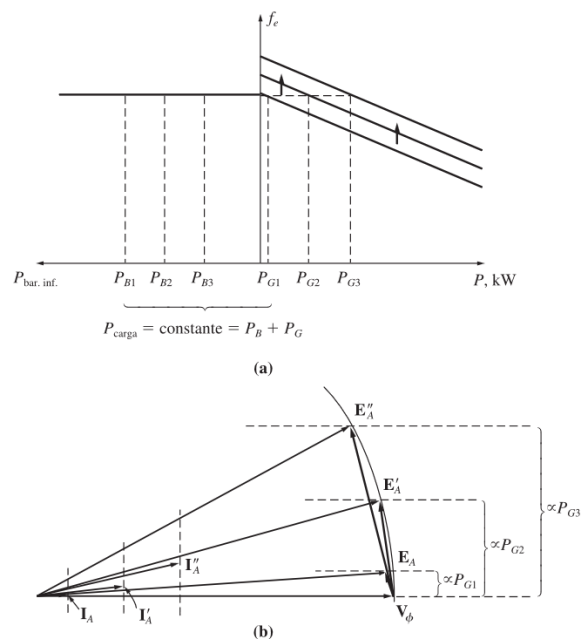
Figura 48 – Potência ativa *versus* frequência de um gerador, instantes após ser ligado à rede, fornecendo (a) e consumindo potência ativa (b)



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Após a conexão, devido a frequência ser imposta pelo barramento infinito, se o ajuste do regulador de velocidade for aumentado, o gerador passa a fornecer mais potência ativa, como pode ser visto na Figura 49-a.

Figura 49 – Efeito do aumento do incremento do ajuste do regulador de velocidade na potência ativa (a) e *diagrama fasorial* (b)



Fonte: CHAPMAN, 2013.

Na Figura 49-b pode ser visto que o módulo de E_A permanece inalterado pois assume-se que I_f permanece constante e a frequência é imposta pelo *barramento infinito*. Assim, a corrente I_A aumenta e fica adiantada em relação a V_ϕ , ou seja, o gerador trocar potência reativa capacitiva com o barramento (CHAPMAN, 2013).

Para que o gerador passe a trocar potência reativa indutiva com o sistema, primeiro deve-se manter a potência ativa inalterada, bastando para isso que não se altere o ajuste do regulador de velocidade. Em seguida, aumenta-se a corrente de campo, de modo que E_A se eleve. Como o valor de V_ϕ é imposto pelo barramento, o módulo e o ângulo de $jX_s I_A$ se alteram. Assim, o ângulo da corrente de armadura é atrasado com relação a tensão terminal (CHAPMAN, 2013).

Dessa forma, conclui-se que o *barramento infinito* impõe a tensão e a frequência do gerador e que o ajuste da referência de velocidade controla a potência ativa e a corrente de campo controla a potência reativa (CHAPMAN, 2013).

4.3.7 Curva de capacidade e curvas V

Normalmente, há dois fatores limitantes para a potência de um gerador síncrono: o torque mecânico no eixo da máquina e as correntes nos enrolamentos. Quanto ao torque no eixo, este normalmente é projetado de modo a suportar uma potência até superior a nominal. Na prática, são as correntes que limitam a potência de um gerador, pois impõem um aquecimento nos condutores dos enrolamentos (CHAPMAN, 2013).

Das equações (89) e (90) deduz-se que a corrente de armadura máxima (I_{Amax}) define a potência aparente nominal (S_{nom}) de um gerador. O efeito do aquecimento dos enrolamentos do estator, é dado por

$$P_{PCE} = 3 \cdot I_A^2 \cdot R_A, \quad (97)$$

sendo P_{PCE} a potência dissipada no cobre do enrolamento do estator (CHAPMAN, 2013).

De modo semelhante, a potência dissipada no enrolamento de campo do rotor, P_{PCR} , é

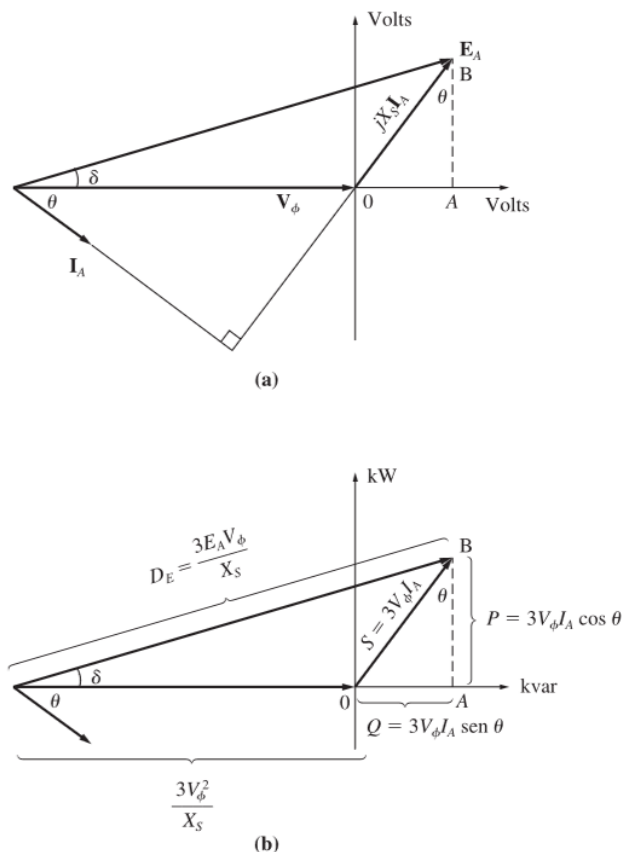
$$P_{PCR} = 3 \cdot I_f^2 \cdot R_F, \quad (98)$$

sendo R_F a resistência do enrolamento de campo.

Da equação (84) deduz-se que a tensão interna é dependente de I_f . Como E_A varia em função do fator de potência, a corrente de campo máxima (I_{fmax}) e a tensão de interna máxima (E_{Amax}) definem um limite de potência reativa do gerador, ou seja, seu fator de potência nominal (CHAPMAN, 2013).

Para expressar os limites de um gerador normalmente se utilizam as chamadas *curvas de capacidade*, que expressam as máximas potências, ativa e reativa, para condições de operação com tensão nominal (UMANS, 2014). Uma *curva de capacidade*, é um diagrama de potência obtido a partir do *diagrama fasorial* do gerador, pela multiplicação das tensões por um fator apropriado ($3V_\phi^2/X_s$) como ilustrado na Figura 50-a e na Figura 50-b. Em uma *curva de capacidade*, ilustrada na Figura 51, as circunferências obtidas a partir de E_A e $jX_s I_A$, definem, os limites de potência reativa e ativa do gerador (CHAPMAN, 2013).

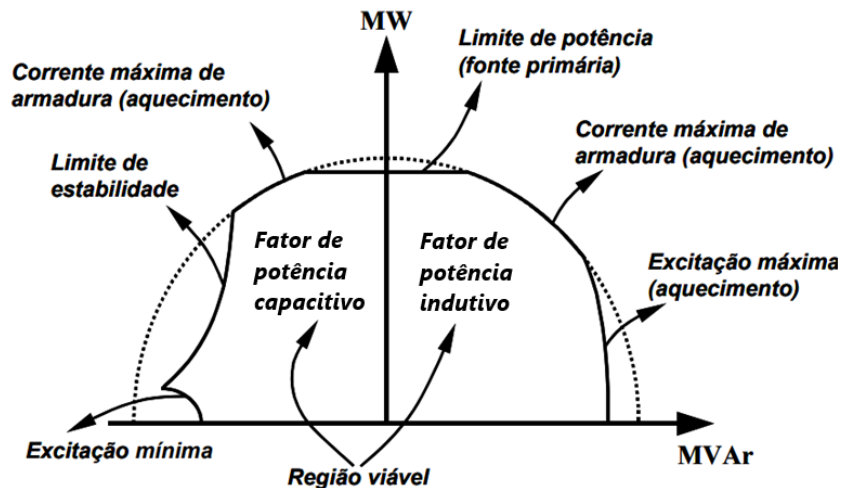
Figura 50 – Diagramas fasoriais de tensões (a) e de potências (b)



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Na Figura 51, pode-se observar também que, pode existir uma limitação de potência ativa imposta pela fonte de força motriz (CHAPMAN, 2013), além de limite mínimo de corrente I_f e limite de estabilidade da máquina relacionado ao ângulo δ (RAGNEV, 2005).

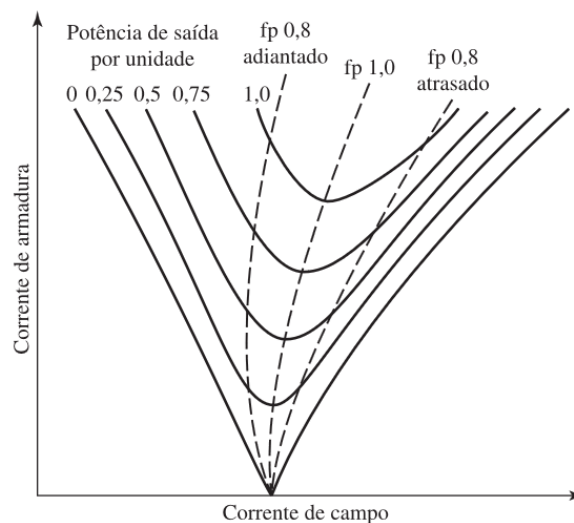
Figura 51 – Curva de capacidade de um gerador síncrono



Fonte: Adaptado de RAGNEV (2005).

Outro meio de se mostrar as características de um gerador síncrono é por meio das chamadas *curvas V*, como mostrado na Figura 52. Essa família de curvas relaciona as correntes de campo e de armadura.

Figura 52 – Curvas V típicas de um gerador síncrono



Fonte: (UMANS, 2014).

Essas curvas, mostram como a corrente de armadura, I_A , se comporta quando se varia I_f , à medida em que o fator de potência é alterado na condição de tensão terminal e potência ativa constantes. À esquerda da linha tracejada do fator de potência unitário, há uma diminuição de I_f (*subexcitação*) e o fator de potência é capacitivo, ou seja, adiantado. Já à direita, há um aumento de I_f (*sobre-excitação*) e o fator de potência é indutivo, ou seja, atrasado (UMANS, 2014).

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, analisou-se a cogeração de energia no setor sucroalcooleiro, evidenciando sua importância na busca por maior eficiência e por vantagens ambientais. Por meio de uma pesquisa bibliográfica, mostrou-se um breve histórico da cana-de-açúcar, da cogeração de energia e dos equipamentos utilizados nesse processo, com foco nas máquinas elétricas.

O uso da cana-de-açúcar evoluiu significativamente ao longo da história, transformando os antigos engenhos nas modernas indústrias sucroenergéticas. Essa evolução permitiu a produção diversificada de açúcar, etanol e bioeletricidade com baixa emissão líquida de CO₂. Já a cogeração, geração combinada de calor e energia mecânica e/ou elétrica, evoluiu das primeiras máquinas a vapor até as modernas turbinas *multi-estágios*, permitindo extrair o máximo de energia do combustível e maximizando a geração de energia nas usinas sucroalcooleiras.

No contexto da cogeração de energia nas indústrias de açúcar e álcool, mostrou-se a importância das máquinas elétricas. Os motores de indução, que apesar de não serem os agentes de geração de energia elétrica neste contexto, permitem aos geradores síncronos, ligados em paralelo ao SIN, converterem a máxima quantidade de energia mecânica das turbinas a vapor, em energia elétrica. Isso se deve ao fato dos motores de indução trifásicos, serem extremamente eficientes na tarefa de transformar energia elétrica em energia mecânica, ao acionar os equipamentos necessários ao processo de preparo e extração.

Por fim sugere-se como temas para trabalhos futuros na temática da cogeração, explorar os aspectos econômicos envolvidos, como por exemplo, o contrato entre a usina e o sistema elétrico com a quantidade de energia elétrica a ser produzida e os custos operacionais envolvidos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Helder Henrique de Campos. **Estudo dos métodos de partida dos motores de indução trifásicos – MIT**. 2021. 105 p. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/215181>. Acesso em: 24 set. 2025.
- Biomassa quebra recorde de geração de energia em 2023. **Jornal Cana**, Ribeirão Preto, 25 abr. 2025. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/industria/cogeracao/biomassa-quebra-recorde-de-geracao-de-energia-em-2023/>. Acesso em: 23 set. 2025.
- FUNDIÇÃO MORENO. **Produtos: Açúcar e Etanol**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.moreno.ind.br/produtos/acucar-etanol/sistema-para-preparo-de-cana>. Acesso em: 03 maio 2025.
- LAZZARINI, Camilla Miguel Carrara. **Modeling and optimization of production in sugar and alcohol milling company**. 2012. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2012.87> Acesso em: 13 abr. 2025.
- CARDOSO, Tiago Fiori. **Cogeração de energia através do bagaço da cana-de-açúcar**: Revisão de literatura. 2011. 29 f. (Especialização em Gestão e Tecnologias Ambientais). Universidade Federal de São Carlos, Sertãozinho, 2011. Disponível em: <https://www.mta.ufscar.br/arquivos/publicacoes/sertaozinho-ii/monografia-tiago-fiori-cardoso.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2025.
- CARVALHO, Daniel Pereira de. **Monitoramento wireless de eficiência e condição de operação de motores de indução trifásicos**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14537>. Acesso em 26 set. 2025.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. *E-book*. ISBN 9788580552072. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580552072/>. Acesso em: 22 set. 2025.
- 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. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/61592d8d-fdb0-4e1f-8c5c-1c2d0ec8da24/ADILSON%20EUGENIO%20SALESSU%20CHICOA%202017.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, Ministério de Minas e Energia – MME. **Balanco Energético Nacional 2025**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 26 set. 2025.

ONS. **O Sistema em Números**: Evolução da Capacidade instalada no SIN – Setembro 2025 /Dezembro 2029. Rio de Janeiro, set. 2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 26 set. 2025.

PAZIAN, João Antonio. **Desenvolvimento de uma metodologia para análise do potencial de cogeração de energia elétrica em usina de açúcar e álcool**. 2004. 205 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/90815>. Acesso em 12 set. 2025.

PISTORE, Thiago Teodoro. **Avaliação Técnico - Econômica e Ambiental da Eletrificação das Moendas na Indústria Sucroalcooleira**. Itajubá, 2004. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3272>. Acesso em: 08 fev. 2025.

QUEIROZ, Gil Mesquita de Oliveira Rabello. **Análise de dificuldades técnicas e econômicas na inserção da cogeração pelas usinas sucroalcooleiras**. 2008. 135 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/87119>. Acesso em: 28 jan. 2025.

RAGNEV, Walter. **Estudo de potência reativa, tensão, contingência e perdas em empresas de energia elétrica localizadas na Grande São Paulo**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14659>. Acesso em: 06 out. 2025.

RODRIGUES, Gelze Serrat de Souza Campos; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil** [recurso eletrônico]: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Uberlândia: EDUFU, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29699>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ROMÃO JÚNIOR, Ricardo Agudo. **Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana de açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira**. 2009. 164 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/88868>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SALOMON, Karina Ribeiro. **Avaliação quantitativa do impacto ambiental das emissões gasosas e do uso da água de resfriamento em instalações de geração termelétrica**. 2003. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá Itajubá, 2003. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3556>. Acesso em: 24 jul. 2025.

SANTOS, Fernando Alves dos. **Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica**: usina de açúcar, etanol e bioeletricidade. 2012. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2012.tde-05102012-105550>. Acesso em: 20 abr. 2025.

SANTOS, Maria Goreti Braga dos. **Cana-de-açúcar**. [S. l.]: Embrapa, 2013. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/677009/cana-de-acucar>. Acesso em: 19 abr. 2025.

SILVA, Caio Eduardo. **Análise da viabilidade e da confiabilidade de uma configuração alternativa de conversores de frequência para o acionamento de motores distantes e em ambientes e hostis**. 2023. 288 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39476>. Acesso em 16 nov. 2025.

SILVA, Marcio Evaristo. **Análise experimental da reforma a vapor de etanol: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos**. 2010. 159 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/106446>. Acesso em: 12 abr. 2025.

SIMONE, Gilio A. **Máquinas de Indução Trifásicas - Teoria e Exercícios**. 2. ed. Rio de Janeiro: Érica, 2009. *E-book*. ISBN 9788536519814. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536519814/>. Acesso em: 22 set. 2025.

SOUZA, Elis Diana Socossiuc. **Características dos geradores síncronos e seu papel na cogeração de energia no setor sucroalcooleiro**. Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro. 2024. 68 p. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/252464>. Acesso em: 28 jan. 2025.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. *E-book*. ISBN 9788580553741. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580553741/>. Acesso em: 22 set. 2025.

VIANA JÚNIOR, Lideir. **Cogeração: desenvolvimento de metodologia para avaliação energética: estudo de caso aplicado a indústria de papel e celulose**. 1999. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Disponível em: https://bib.pucminas.br/teses/EngEletrica_VianaJuniorL_1.pdf. Acesso em: 26 abr. 2025.

WEG S.A. **Açúcar e Etanol: Geração e Cogeração de energia**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/solutions/sugar-ethanol/energy-generation-and-cogeneration>. Acesso em: 30 set. 2025.

WEG S.A. **Açúcar e Etanol**: Moenda. [S.l.], 2025. Disponível em:
<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/sugar-ethanol/sugarcane-mill>.
Acesso em: 30 set. 2025.

WEG S.A. **Açúcar e Etanol**: Preparo. [S.l.], 2025. Disponível em:
<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/sugar-ethanol/preparation>. Acesso
em: 30 set. 2025.