

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

ELIS DIANA SOCOSSIUC SOUZA

CARACTERÍSTICAS DOS GERADORES SÍNCRONOS E SEU PAPEL NA
COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

ELIS DIANA SOCOSSIUC SOUZA

**CARACTERÍSTICAS DOS GERADORES SÍNCRONOS E SEU PAPEL NA
COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO**

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de
Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira - Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro

**ILHA SOLTEIRA
2023**

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

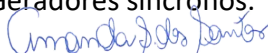
S729c Souza, Elis Diana Socossiuc.
Características dos geradores síncronos e seu papel na cogeração de energia no setor sucroalcooleiro / Elis Diana Socossiuc Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
68 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro

Inclui bibliografia

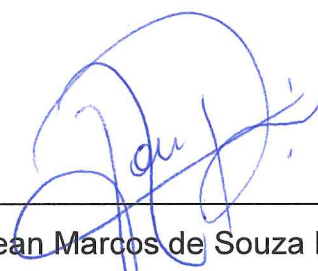
1. Cana-de-açúcar. 2. Setor sucroalcooleiro. 3. Cogeração de Energia. 4. Máquinas elétricas. 5. Geradores síncronos.

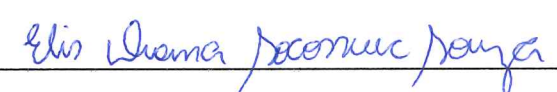

Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e quatro dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e três, a discente **Elis Diana Socossiuc Souza**, matriculada sob o nº 161050913, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro*, o *Prof. Dr. Carlos Antonio Alves* e o *Doutorando Rodrigo Serra Daltin*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**CARACTERÍSTICAS DOS GERADORES SÍNCRONOS E SEU PAPEL NA COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO**", obtendo a nota 9,5 (NOVE E MEIO) e conceito aprovado.



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

Elis Diana Socossiuc Souza
- discente-

Prof. Dr. Carlos Antonio Alves
- Membro da Banca -

Doutorando Rodrigo Serra Daltin
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os professores que de alguma forma me incentivaram a continuar nesta caminhada em busca de conhecimento ao longo da vida. Acima de tudo aos meus pais, Janete e Edilson, ambos professores da rede pública e que me ensinaram muito do que faz parte de mim hoje. Ter feito diferença no meu futuro não é nada perto de todas as pessoas que vocês já ensinaram a sonhar.

Rubem Alves disse uma vez: "Há escolas que são gaiolas e há escolas que são asas". Agradeço aos professores que sempre me fizeram voar! Especialmente ao professor Jean Ribeiro, pelo incentivo e por ensinar de forma tão cativante, obrigada por compartilhar seu amor pela engenharia elétrica com seus alunos. Ao meu mentor de estágio, Sebastião Carpi, a quem poderia facilmente me referir como mestre, devido a tamanha quantidade de conhecimento e delicadeza ao passá-lo adiante.

Gostaria de citar meus grandes professores Neide, Silvia Regina, Cida Minhoca, Ideuza, Clemicelia, Elisangela, Edith, Mario, Bete, Daiane, Rogério, Ana Paula, Ana Valéria, Lilian, Celina e minha eterna diretora, tia Tica.

Passar por este mundo sem pegadas é impossível, nossos pés tocam o chão e deixam marcas, como ao caminhar na beira do mar. Professores, vocês deixaram marcas em todos que já passaram por suas vidas, inclusive em mim, por isso, lhes dedico este trabalho hoje.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, que sempre vibrou e torceu em cada momento importante pelo qual passei ao longo desta trajetória, além de me darem todas as condições possíveis para que esse momento acontecesse.

Ao meu companheiro, Leonardo, agradeço imensamente por tudo que passamos juntos nesses últimos 4 anos, principalmente pela parceria na conclusão deste curso.

A todos os meus grandes amigos da turma 2016/01 e a todas as pessoas incríveis que Ilha Solteira me apresentou, as quais tenho um imenso carinho até hoje. Agradeço a vocês por dividirem esses anos dos quais jamais irei me esquecer.

Aos meus amigos Bárbara Torquato, Neto, Gabriela Oliveira, Gabriela Cacefo, Marília Vergara, Nathália Ferreira e Natália Suniga, que, de alguma forma, do ensino médio até hoje, fizeram minha vida mais feliz. Nosso tempo não volta, mas as lembranças são eternas.

A Siemens Energy e todas as pessoas que conheci por lá, especialmente ao meu time CD, por fazerem da minha primeira experiência profissional em engenharia elétrica ter sido a melhor possível. Eu não teria escolhido de outra forma.

Por último, gostaria de agradecer ao teatro, que me fez lembrar o quão bom é viver!

“Em algum lugar, algo incrível está esperando para ser descoberto.” Carl Sagan, 1977.

RESUMO

Este trabalho de graduação examina a relevância dos geradores síncronos na cogeração de energia na indústria sucroalcooleira, destacando seu papel na transformação do calor gerado em eletricidade e contribuindo para a autonomia energética e estabilidade do sistema elétrico. Inclui uma revisão histórica da cana-de-açúcar no Brasil, abordando a evolução do setor sucroalcooleiro desde a era da escravidão até as inovações tecnológicas atuais. O estudo detalha o conceito e mecanismo da cogeração de energia, enfatizando os benefícios ecológicos e econômicos, assim como a arquitetura e o funcionamento das usinas sucroalcooleiras com foco no gerador síncrono. Por fim, sintetiza a importância destes geradores a partir de uma análise de engenharia mais aprofundada.

Palavras-chave – Máquinas elétricas. Máquina Síncrona. Cana-de-açúcar. Etanol. Sistema de Excitação. Usina.

ABSTRACT

This academic paper examines the relevance of synchronous generators in the cogeneration of energy in the sugar-alcohol industry, highlighting their role in transforming the heat generated into electricity and contributing to the energy autonomy and stability of the electrical system. It includes a historical review of sugar cane in Brazil, covering the evolution of the sugar-alcohol industry from the era of slavery to current technological innovations. The study details the concept and mechanism of energy cogeneration, emphasizing the ecological and economic benefits, as well as the architecture and operation of sugarcane mills with a focus on the synchronous generator. Finally, it summarizes the importance of these generators based on a more in-depth engineering analysis.

Keywords – Electrical machines. Synchronous machine. Sugarcane. Ethanol. Excitation system. Power plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plantação de cana-de-açúcar.....	17
Figura 2 - Mapa da distribuição global da cana-de-açúcar.....	18
Figura 3 - Ciclos <i>topping</i> (a) e <i>bottoming</i> (b).....	26
Figura 4 - Vapor gerado na caldeira para alimentar a turbina a vapor.....	28
Figura 5 - Saída do vapor da caldeira e entrada do vapor na admissão da turbina a vapor.	28
Figura 6 - Movimento de rotação do eixo da turbina a vapor girando o eixo do gerador elétrico / redutor.	28
Figura 7 - Turbinas a vapor de contrapressão.....	30
Figura 10 - Desenho básico de um trocador de calor.....	32
Figura 11 – Protótipos de máquinas elétricas: pioneirismo no século XIX. Acervo museu virtual.....	35
Figura 12 - Circuito magnético simples. λ é o fluxo concatenado do enrolamento.....	38
Figura 13 - Exemplificação da Lei de Faraday e Lenz.....	40
Figura 14 - Conversores eletromecânicos de energia.....	41
Figura 15 - Força eletromotriz gerada por uma bobina móvel num campo uniforme.	42
Figura 16 - Rotor do gerador de Itaipu com 1760 toneladas a 90 rpm.	45
Figura 17 - Orquestra sinfônica dentro de um estator de um gerador síncrono na Usina Hidrelétrica de Itaipu.	46
Figura 18 - Eixo que acopla a turbina ao gerador.	46
Figura 19 - Diagrama esquemático de um gerador trifásico de polos lisos.....	48
Figura 20 - Armadura de um gerador síncrono trifásico refrigerado a ar de 100 MVA em construção.....	48
Figura 21 - Vista da extremidade do estator de um gerador a turbina de 16,5 kV, 275 MVA e 3600 rpm.	49
Figura 22 - Instalação do enrolamento de campo no rotor de um gerador síncrono de 2 polos.	49
Figura 23 - Rotor de um gerador a turbina de 100 MW. Um sistema de excitação sem escovas, usado para fornecer a corrente de campo, pode ser visto na extremidade mais próxima do rotor.	50
Figura 24 - À esquerda uma máquina síncrona trifásica de 2 polos salientes e à direita uma máquina síncrona trifásica de 4 polos salientes.	51
Figura 25 - Enrolamento de armadura distribuídos de uma máquina síncrona trifásica de dois polos.	52
Figura 26 - Painel compondo o sistema de excitação e regulação de tensão.....	54

Figura 27 - Representação de uma máquina síncrona trifásica de 4 polos salientes.....	55
Figura 28 – Exemplo de um diagrama unifilar de um gerador e um sistema de excitação estática.....	57
Figura 29- Gerador síncrono com escovas com seus anéis coletores e escovas de carbono, fabricante Siemens Energy Brasil.	61
Figura 30 - Exemplo de um painel elétrico compondo o sistema de excitação estática e regulação de tensão, fabricante Siemens Energy Brasil.	62
Figura 31 – Exemplo de um diagrama unifilar de um sistema de excitação estática e regulação de tensão, fabricante Siemens Energy Brasil.	63
Figura 32 – Exemplo de um diagrama unifilar de um sistema de excitação <i>brushless</i> e regulação de tensão, fabricante Siemens Energy Brasil.	64
Figura 33 - Conjunto de todas as máquinas solidárias ao eixo da turbina.....	65
Figura 34 - Gerador síncrono <i>brushless</i> com sua respectiva excitatriz piloto e o PMG.	65
Figura 35 – Exemplo de um painel elétrico compondo o sistema de excitação <i>brushless</i> e regulação de tensão, fabricante Siemens Energy Brasil.	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AVR	Automatic Voltage Regulator
B	Densidade de fluxo magnético
B6C	<i>Fully controlled six-pulse bridge circuit</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CGCE	Câmara de Gestão da Crise Energética
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
DCS	<i>Distributed control system</i>
E	Intensidade de campo elétrico
e	Tensão induzida no enrolamento
f	Frequência
FAPERJ	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
FCR	<i>Field current regulator</i>
FMM	Força magnetomotriz
H	Intensidade de campo magnético
I	Corrente elétrica
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
I_f	Corrente de excitação
IGBT	<i>Insulated-gate bipolar transistor</i>
J	Densidade de corrente
L	Indutância
Lanteg	Laboratório de Novas Tecnologias para o Ensino de Graduação
MAE	Mercado Atacadista de Energia Elétrica
N	Número de espiras ou rotações por minuto
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
p	Número de polos do rotor da máquina síncrona
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPM	Rotações por minuto
TC	Transformador de corrente

TP	Transformador de potência
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
X_d	Reatância do eixo direto
X_q	Reatância do eixo de quadratura
X_s	Reatância síncrona
λ	Fluxo concatenado do enrolamento
φ	Fluxo magnético
ϕ	Valor instantâneo para o fluxo magnético variável no tempo

SUMÁRIO

1	Introdução	13
2	A Cana-de-açúcar e o Setor Sucroalcooleiro no Brasil	17
2.1	A Trajetória da Cana-de-açúcar: De sua origem à disseminação no Brasil.....	17
2.2	Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro no Brasil	20
3	Cogeração de Energia no Setor Sucroalcooleiro	23
3.1	Fundamentos Gerais da Cogeração de Energia	23
3.2	Caracterização da Cogeração no Setor Sucroalcooleiro.....	25
3.3	Estrutura e Componentes da Cogeração na Usina Sucroalcooleira	27
4	Geradores Síncronos	34
4.1	Introdução à Máquinas Elétricas.....	34
4.2	Princípios do Eletromagnetismo nas Máquinas Elétricas	36
4.3	Características Construtivas dos Geradores Síncronos	41
4.3.1	<i>Sistemas de Excitação Estáticos</i>	<i>61</i>
4.3.2	<i>Sistemas de Excitação Brushless.....</i>	<i>64</i>
5	Considerações Finais.....	68
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de graduação emergiu das experiências e conhecimentos adquiridos durante os cursos de Máquinas Elétricas I e II na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) e um estágio supervisionado na empresa Siemens Energy. O estágio, que durou de julho de 2021 a fevereiro de 2023, teve início em uma imersão prática nas dinâmicas da engenharia de controle de turbinas a vapor e nos desafios técnicos de suas soluções aplicadas a geração e cogeração de energia.

A formação em engenharia elétrica na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira teve enfoque principal em eletrônica de potência. No entanto, a exposição ao tema de controle e automação, com enfoque nas máquinas a vapor, assim como a interação com o mercado termoeletrico durante o estágio supervisionado ampliaram a perspectiva profissional. Essa experiência interdisciplinar revelou a relevância transversal dos turbogeradores - dispositivos centrais no processo de cogeração de energia e pilares do crescente setor sucroalcooleiro brasileiro.

Ao aprofundar-se na especialização, migrou-se para a engenharia de sistemas de excitação para máquinas síncronas, em sua maioria, geradores síncronos. Este movimento permitiu a compreensão integral dos turbogeradores, uma compreensão que se provou inestimável em qualquer um dos dois setores de atuação futura. A afinidade com a temática das máquinas síncronas consolidou a decisão de aprofundar-se o resto do estágio neste campo.

As plantas industriais, como as de açúcar e álcool, papel e celulose, química e petroquímicas, geram calor como subproduto de seus processos industriais (FIOMARI, 2004).

Os turbogeradores industriais geralmente consistem em uma turbina acionada pelo vapor gerado nos processos industriais e um gerador síncrono que converte a rotação da turbina em energia elétrica. A escolha do tamanho e da capacidade do turbogerador depende das necessidades de energia da indústria e da quantidade de calor disponível para geração. Essas máquinas permitem a recuperação desse calor e sua conversão em eletricidade.

Ao produzir eletricidade internamente por meio de uma fonte confiável de energia como a cogeração com turbogeradores, as indústrias foram capazes de reduzir a dependência da rede elétrica pública, o que foi crucial para as plantas que operam 24 horas por dia, evitando interrupções e perdas de produção devido a falhas na rede elétrica.

As indústrias que geram mais eletricidade do que consomem podem vender o excedente no mercado livre de energia. A receita da venda de energia no mercado livre pode ser usada para equilibrar os custos operacionais e fornecer estabilidade financeira à indústria, especialmente quando os preços da energia variam. A capacidade de fornecer energia excedente à rede elétrica

pública também contribui para a estabilidade do sistema elétrico de potência, o que ajuda a atender à demanda durante picos de consumo, que muitas vezes resultam em tarifas elétricas mais altas caso a indústria dependa da rede elétrica (FIOMARI, 2004).

Já as centrais elétricas, diferentemente das plantas industriais, desempenham um papel vital na geração de eletricidade em larga escala para abastecer cidades, regiões ou países inteiros. Os turbogeradores estão em sua maioria localizados nestas usinas geradoras. Portanto, além de sua importância na cogeração de energia no mercado industrial, estes são parte integrante da geração de alta tensão que é transmitida pelas linhas de transmissão para centros de distribuição e consumidores.

Existem diversos tipos de centrais elétricas, que se utilizam de diferentes fontes de energia e tecnologias para produzir eletricidade. Estas usinas geradoras possuem turbogeradores, como as termelétricas, hidrelétricas e nucleares, para produzir eletricidade de base, o que significa que podem fornecer energia contínua e estável para a rede elétrica. Isso é fundamental para manter as operações diárias e atender à demanda constante de eletricidade.

Citando de forma ampla sobre os tipos de aplicações específicas de turbinas acopladas a geradores síncronos, tem-se, por exemplo, utilizações em termelétricas a combustíveis fósseis que utilizam carvão, petróleo ou gás natural como combustível principal. Queima-se o combustível em uma caldeira para que a água seja aquecida e produza o vapor, que aciona a turbina. Embora esse processo de geração de energia ainda esteja presente em muitas regiões do mundo, ele possui grandes desvantagens devido às emissões de gases de efeito estufa e poluentes.

A utilização dos turbogeradores também se estende a indústrias de petróleo e gás, onde são aplicados em plataformas offshore e refinarias, aproveitando os subprodutos do processo de refino para geração de energia elétrica.

As usinas nucleares utilizam reações nucleares para gerar calor, que é usado para vaporizar a água e mover a turbina. Oferecem uma fonte de energia de base confiável, mas enfrentam preocupações de segurança e gerenciamento de resíduos nucleares.

O funcionamento das usinas hidrelétricas baseia-se no aproveitamento da energia cinética da água em movimento, geralmente em rios ou barragens, para produzir o torque necessário para o funcionamento da turbina acoplada a um gerador síncrono. São limpas, renováveis, mas dependem da disponibilidade de recursos hídricos. O Brasil dispõe de uma abundância de recursos energéticos hídricos e utiliza hidrogeradores de alta capacidade, que são fundamentais para o fornecimento de energia em todo o território nacional.

Consideradas fontes de energia limpa e renovável, as usinas de energia solar captam a luz do sol usando painéis fotovoltaicos ou concentradores solares para gerar eletricidade diretamente.

Também uma fonte de energia limpa e renovável, a energia eólica é produzida através da conversão da energia cinética do vento em eletricidade, utilizando turbinas eólicas.

Em sistemas de geração de energia elétrica que dependem significativamente de fontes intermitentes, como a energia solar e eólica, a disponibilidade de eletricidade pode variar consideravelmente devido às condições climáticas e ao ciclo do dia. Durante períodos de baixa geração a partir dessas fontes, os turbogeradores podem ser acionados como uma fonte de energia de backup imediata e confiável.

A intermitência das fontes renováveis pode causar flutuações na geração de eletricidade que afetam a estabilidade da rede elétrica. Os turbogeradores, quando operados em conjunto com fontes intermitentes, ajudam a estabilizar a frequência e a tensão da rede, garantindo que a eletricidade seja fornecida de forma consistente e confiável. Em vez de desperdiçar o excesso de eletricidade gerada durante picos de produção de energia solar ou eólica, os turbogeradores podem entrar em operação para absorver o excedente de eletricidade e convertê-lo em energia que pode ser armazenada (por meio de baterias ou sistemas de armazenamento térmico) ou utilizada imediatamente. Isso ajuda a evitar o desperdício de recursos.

As usinas de biomassa queimam resíduos orgânicos, como madeira, resíduos agrícolas ou resíduos urbanos, para gerar calor que é usado para produzir vapor e eletricidade. Aproveitam materiais renováveis, mas a eficiência depende da disponibilidade de biomassa (FIOMARI, 2004).

Outra aplicação muito interessante dos turbogeradores são nas usinas geotérmicas, comuns em países que estão em áreas de encontro de placas tectônicas e de intensa atividades vulcânicas. A primeira etapa do processo de geração de energia por meio do aproveitamento da captação do calor presente no subsolo terrestre é feita perfurando-se um poço profundo na crosta terrestre, onde a temperatura aumenta quanto maior a profundidade. A água é injetada no poço para entrar em contato com as camadas quentes do subsolo, e o calor presente nessas camadas faz com que a água se transforme em vapor, rico em energia térmica, que é direcionado para a superfície e conduzido até uma turbina, resultando na rotação da turbina e o gerador síncrono acoplado a ela é capaz de converter essa energia mecânica em eletricidade. Após a passagem pela turbina, o vapor é resfriado e condensado de volta à forma líquida. Em seguida, ele pode ser reinjetado no subsolo para recomençar o ciclo. São fontes de energia renovável e de baixa emissão de carbono, mas dependem da localização geográfica.

A eficiência e confiabilidade das turbinas acopladas a geradores síncronos, sendo que estas desempenham um papel importante na estabilização da frequência e da tensão da rede elétrica, são características essenciais que os tornam atrativos para várias aplicações. Sua capacidade de resposta rápida às variações de carga e sua flexibilidade operacional permitem um fornecimento

estável de energia elétrica, tornando-os adequados para atender tanto a demandas constantes como a picos de carga. Além disso, os avanços tecnológicos na área de turbogeradores têm permitido melhorias significativas em termos de eficiência energética, redução de emissões e manutenção dos equipamentos.

Este trabalho visa oferecer uma exploração aprofundada sobre os geradores síncronos, enfatizando suas funcionalidades e importância dentro do setor de geração de energia, especialmente tratados aqui do ponto de vista da cogeração na indústria sucroalcooleira.

O segundo capítulo se inicia com uma revisão histórica da cana-de-açúcar, acompanhando a evolução da compreensão e utilização humana desta planta ao longo dos tempos. Irá ser discutido sobre a introdução da cana no Brasil, traçando-se sua trajetória e impacto no desenvolvimento nacional desde a colonização até a contemporaneidade (RODRIGUES; JURANDYR, 2023).

Em seguida, adentrou-se na esfera do cultivo e processamento da cana, conduzindo a análise para a ascensão do setor sucroalcooleiro. Aborda-se o contexto da evolução tecnológica, incluindo o período em que a mão de obra escrava era empregada, até as inovações modernas que permeiam o setor.

O terceiro capítulo foi dedicado à cogeração de energia, detalhando o conceito e o mecanismo deste processo, inicialmente de maneira ampla, para posteriormente focar em sua aplicação específica na indústria de açúcar e álcool. Com a discussão, tem-se como intuito analisar os benefícios ecológicos e econômicos da cogeração, explorando como a estrutura e componentes das usinas sucroalcooleiras se beneficiam desta técnica para maximizar a eficiência e sustentabilidade operacional (FIOMARI, 2004).

Em uma perspectiva de engenharia, detalha-se a arquitetura de uma usina sucroalcooleira, desde seus componentes fundamentais até a sinergia que possibilita a cogeração de energia.

Para o quarto capítulo, enfatiza-se a máquina síncrona como elemento essencial neste sistema energético, estando no cerne da produção de energia. Discorre-se sobre a evolução dos geradores síncronos, abrangendo a física e matemática que embasam sua construção e funcionamento. Aprofunda-se no estudo do eletromagnetismo que gera energia elétrica, com foco na conversão eletromecânica.

Ao final, este trabalho sintetiza os conceitos apresentados, vinculando-os para ilustrar como o gerador síncrono é uma peça-chave na cogeração de energia no setor sucroalcooleiro. Este trabalho terá atingido seu propósito se por meio desta jornada acadêmica o leitor tenha sido capaz de compreender integralmente a interdependência entre a produção de cana-de-açúcar e a geração de energia, refletindo sobre a importância desta sinergia para o avanço tecnológico e sustentável deste setor no Brasil.

2 A CANA-DE-AÇÚCAR E O SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL

Nesta seção, apresentam-se as origens ancestrais e a evolução botânica da cana-de-açúcar, assim como sua importância nas culturas antigas.

2.1 A TRAJETÓRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR: DE SUA ORIGEM À DISSEMINAÇÃO NO BRASIL

Como ilustrado na Figura 1, esta planta exibe um caule esguio e alongado, acompanhado por folhagens amplas, e é capaz de atingir alturas impressionantes de até seis metros.

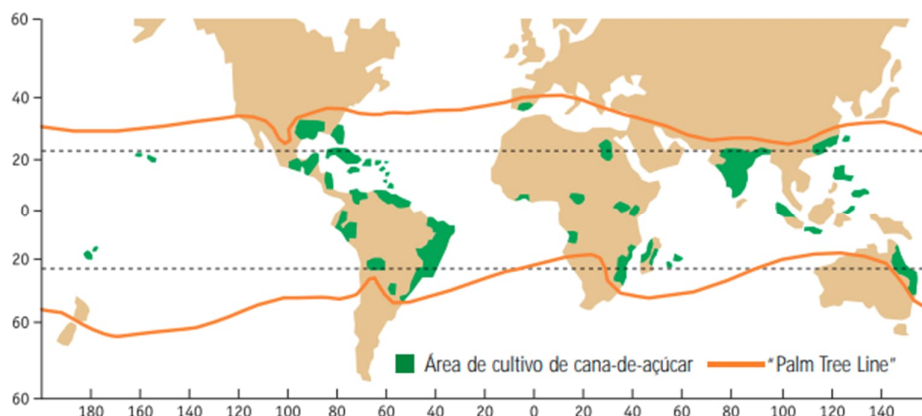
Figura 1 - Plantação de cana-de-açúcar.



Fonte: (JORNALISTAFPA, 2022).

Outra característica interessante da cana-de-açúcar, como é possível visualizar no mapa da Figura 2, é sua capacidade de adaptação e crescimento em uma ampla gama de ambientes e altitudes, de forma que se percebe sua distribuição global em todos os continentes, sendo cultivada em todas as zonas tropicais e subtropicais, abrangendo áreas ao norte e ao sul do Equador, paralelamente à área de ocorrência das palmeiras, conhecida como “*Palm Tree Line*”, que define a região de crescimento das palmeiras e os limites da zona tropical (CIB, 2009).

Figura 2 - Mapa da distribuição global da cana-de-açúcar.



Fonte: (CIB, 2009).

Conforme as informações apresentadas pelo Conselho Internacional de Biotecnologia (CIB) em 2009 (CIB, 2009), acredita-se que a planta tenha se originado no Sudeste Asiático, mais especificamente nas regiões que compreendem a atual Papua-Nova Guiné (a segunda maior ilha do mundo ao sul do Oceano Pacífico) e as Ilhas do Pacífico (como por exemplo Filipinas e Indonésia) há pelo menos 10.000 anos (SILVA, 2010).

A partir destes territórios insulares, teoriza-se que a cana-de-açúcar se espalhou para a Austrália e para a Índia, com evidências indicando sua chegada ao subcontinente indiano aproximadamente em 6000 a.C.

As evidências arqueológicas sugerem que a cana-de-açúcar já era cultivada nessas áreas há milhares de anos e que as primeiras formas domesticadas da planta surgiram a partir de variedades selvagens. A cana-de-açúcar cultivada atualmente é resultado de inúmeras melhorias genéticas realizadas através do cruzamento de suas espécies com o intuito de enriquecer a concentração de açúcares na planta e torná-la resistente a doenças e problemas no campo.

Com o passar do tempo, as técnicas de cultivo e processamento da cana-de-açúcar foram aprimoradas nas civilizações antigas. Os indianos, por exemplo, desempenharam um papel fundamental na evolução da indústria açucareira, fato corroborado por evidências encontradas em documentos literários indianos, que trazem referências ao cultivo da planta. De acordo com os textos budistas antigos chamados *Jatakas*, os indianos foram responsáveis pelo desenvolvimento de métodos de extração de suco de cana e produção de açúcar em forma de cristais sólidos, por volta do século VI e IV a.C.

A partir da Índia, a cana-de-açúcar se disseminou para outras regiões, incluindo o Oriente Médio, o Mediterrâneo e o Norte da África. Durante as conquistas árabes, entre os séculos VII e

VIII, a planta foi introduzida em territórios sob domínio muçulmano, como o Egito e a Península Ibérica (SILVA, 2010).

A partir do século XV, com as Grandes Navegações, a cana-de-açúcar foi levada pelos exploradores europeus para as Américas. Introduziu-se a cana nas ilhas do Caribe, como a Hispaniola (atual Haiti e República Dominicana), Porto Rico, Jamaica e Cuba. A partir dessas ilhas, a produção de açúcar se expandiu para o continente americano, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais, onde as condições climáticas eram favoráveis ao seu cultivo (RODRIGUES; JURANDYR, 2023).

No Brasil, a cana-de-açúcar possui uma história significativa e desempenha um papel crucial na economia do país. A planta foi introduzida pelos colonizadores portugueses durante o período colonial. A primeira plantação de cana-de-açúcar no Brasil foi estabelecida em São Vicente, no atual estado de São Paulo em 1533. No entanto, foi somente após a fundação da cidade de São Paulo, em 1554, que o cultivo da cana-de-açúcar começou a se expandir (D'AGOSTINI, S. et al.).

Durante o século XVI, a produção de açúcar se tornou a principal atividade econômica no Brasil Colonial. Grandes engenhos de açúcar foram estabelecidos ao longo da costa nordeste do país, especialmente nas capitanias de Pernambuco, Bahia e Rio de Janeiro. Essas regiões possuíam condições climáticas e de solo favoráveis para o cultivo da cana-de-açúcar.

A produção de açúcar no Brasil Colonial era baseada em um sistema de plantation, onde grandes extensões de terra eram dedicadas ao cultivo intensivo de cana-de-açúcar por meio do trabalho escravo.

Desde o início do século XVI até o século XIX, milhões de africanos foram trazidos para o Brasil como escravos. Eles eram capturados em diferentes regiões da África e transportados em condições desumanas em navios negreiros para serem vendidos nas colônias (RODRIGUES; JURANDYR, 2023).

Nas plantações de cana-de-açúcar, os escravos eram submetidos a um trabalho árduo e brutal. Eles eram forçados a realizar tarefas como o corte e o carregamento da cana, a moagem nos engenhos e o processamento do açúcar. As condições de trabalho eram extremamente difíceis, com longas horas de trabalho, castigos físicos, falta de alimentação adequada e habitações precárias. A escravidão no contexto da produção de cana-de-açúcar no Brasil teve um impacto profundo na sociedade e na cultura do país. Ela moldou as relações sociais, econômicas e raciais e deixou um legado duradouro.

Apesar do fim formal da escravidão, os efeitos desse período continuaram a reverberar na sociedade brasileira. A população afrodescendente, que teve origem na escravidão, enfrentou e ainda enfrenta desigualdades socioeconômicas significativas, bem como a persistência do racismo

estrutural. A história da cana-de-açúcar e da escravidão no Brasil é complexa e multifacetada. É um tema de estudo amplo e existem muitas fontes acadêmicas e históricas que fornecem uma visão mais aprofundada desse período e suas implicações.

Com o fim do tráfico transatlântico de escravos em 1850 e a abolição da escravatura em 1888, a produção de cana-de-açúcar enfrentou desafios significativos. A mão de obra escrava foi substituída, em parte, por trabalhadores livres, mas também houve uma transição gradual para a utilização de máquinas e tecnologia na produção (RODRIGUES; JURANDYR, 2023).

A discussão sobre o termo "colonização" é multifacetada e merece uma análise cuidadosa, dada sua complexidade. Historicamente, a colonização está intrinsecamente ligada a episódios de exploração, opressão e atos violentos cometidos por potências imperialistas, trazendo consequências devastadoras para muitas culturas ao redor do mundo. Povos indígenas, em particular, enfrentaram injustiças severas, com a usurpação de suas terras, recursos e soberania política durante os tempos coloniais.

Mais do que um simples processo de assentamento ou expansão territorial, a colonização frequentemente significou a sobreposição forçada de valores, crenças e estruturas sociais dos colonizadores sobre as culturas originárias. Este fenômeno levou à marginalização e ao enfraquecimento de tradições, línguas e saberes aborígenes, por vezes causando a erradicação quase completa de culturas inteiras. O uso do termo "colonização" sem a devida contextualização pode, involuntariamente, contribuir para a desvalorização da diversidade cultural e a resistência contínua dessas comunidades ao longo da história.

Além disso, a ideologia por trás da colonização está profundamente enraizada em uma visão eurocêntrica do mundo, que historicamente considerava as culturas europeias como superiores e utilizava essa suposta superioridade como justificativa para práticas imperialistas. O emprego continuado do termo, sem crítica ou reflexão, pode inadvertidamente perpetuar uma perspectiva hierárquica obsoleta e desigual, reforçando a noção de que os valores europeus são o padrão de referência universal. Em vista disso, é crucial abordar o termo "colonização" com sensibilidade e consciência histórica, assegurando que seu uso não perpetue as desigualdades do passado.

2.2 DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL

O setor sucroalcooleiro no Brasil teve origem com a chegada da cana-de-açúcar trazida pelos colonizadores portugueses no século XVI. Inicialmente concentrado no Nordeste, especialmente em Pernambuco e Bahia, a produção de açúcar foi voltada principalmente para a exportação (RODRIGUES; JURANDYR, 2023).

Com o tempo, a cultura da cana-de-açúcar se expandiu para outras regiões do país, como o Sudeste, Centro-Oeste e Sul, impulsionada pela descoberta de novas áreas propícias para o cultivo da cana e pela demanda crescente. São Paulo se tornou o maior produtor de açúcar do país (RODRIGUES; JURANDYR, 2023).

No final do século XIX e início do século XX, ocorreu uma transição importante no setor, com a diversificação da produção para o álcool. A valorização do álcool como fonte de energia, impulsionada pelo desenvolvimento de motores a combustão e pela busca por alternativas ao petróleo, levou à busca por fontes renováveis de combustível (RODRIGUES; JURANDYR, 2023).

Na década de 1970, o Brasil enfrentou uma crise do petróleo, o que levou ao lançamento do Programa Nacional do Álcool, conhecido como Proálcool, em 1975. O programa tinha como objetivo substituir a gasolina pelo álcool combustível produzido a partir da cana-de-açúcar. Isso estimulou investimentos no setor sucroalcooleiro, incluindo a construção de novas usinas e o desenvolvimento de tecnologias para aumentar a produtividade e a eficiência na produção de álcool (RODRIGUES; JURANDYR, 2023).

Ao longo do tempo, o setor sucroalcooleiro no Brasil tem se destacado como um dos mais importantes do país. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol. A produção de cana-de-açúcar está concentrada principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Sul, com São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul como os principais estados produtores.

Além do açúcar e do etanol, o setor diversificou sua produção, incluindo subprodutos como melaço e bagaço da cana. Também houve avanços na produção de etanol de segunda geração, que utiliza não apenas o caldo da cana, mas também os resíduos fibrosos.

O setor sucroalcooleiro no Brasil tem um foco significativo em sustentabilidade e energia renovável. A produção de etanol de cana-de-açúcar é considerada uma alternativa mais limpa e sustentável em relação aos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação das mudanças climáticas, também utilizam o bagaço da cana como biomassa para a geração de energia elétrica, tornando-se autossuficientes e até mesmo excedentes na produção de eletricidade.

Ademais, as usinas têm implementado medidas de gestão ambiental, como o tratamento adequado de efluentes, a utilização de técnicas de irrigação mais eficientes e a preservação de áreas de proteção ambiental dentro das propriedades.

O setor sucroalcooleiro também tem investido em tecnologia e inovação. O melhoramento genético da cana-de-açúcar tem sido uma área de foco, visando o desenvolvimento de variedades mais produtivas e resistentes a pragas e doenças. A mecanização agrícola também avançou, com a

adoção de máquinas e equipamentos para o plantio, colheita e transporte da cana-de-açúcar, aumentando a eficiência e a produtividade.

Nas usinas, a automação e o controle avançado têm sido aplicados para otimizar as operações industriais, garantindo maior eficiência e qualidade na produção de açúcar e etanol. Além disso, a produção de etanol de segunda geração, a partir de resíduos da cana-de-açúcar, representa uma inovação tecnológica importante.

O setor sucroalcooleiro tem um papel importante na balança comercial brasileira, uma vez que o país é um dos principais exportadores de açúcar e etanol. Esses produtos são demandados globalmente, especialmente por países consumidores e pela indústria de biocombustíveis.

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos e dos benefícios socioeconômicos e ambientais, o setor sucroalcooleiro também enfrenta desafios. Variações climáticas, pragas e doenças da cana-de-açúcar, restrições regulatórias e oscilações nos preços internacionais do açúcar são alguns dos obstáculos que podem afetar a produção e a rentabilidade do setor.

A busca contínua por inovação, aprimoramento tecnológico e diversificação de produtos são aspectos fundamentais para a sustentabilidade e o crescimento do setor sucroalcooleiro no Brasil. O investimento em pesquisa e desenvolvimento, o estímulo à utilização de fontes de energia renovável e a busca por novos mercados consumidores são estratégias importantes para impulsionar ainda mais esse setor vital para a economia brasileira.

Este setor no Brasil passou por um processo de desenvolvimento ao longo dos anos, desde os primórdios da produção de açúcar até a diversificação para o etanol. Tecnologias avançadas foram aplicadas na agricultura, na industrialização e na geração de energia, visando aumentar a produtividade, a eficiência e a sustentabilidade. O setor desempenha um papel importante na economia, na geração de empregos e na produção de biocombustíveis e açúcar para o mercado interno e externo.

3 COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

A produção combinada de calor e potência (em inglês, CHP ou “*Combined Heat & Power*”), onde seu significado traduzido de forma técnica é conhecido como “cogeração de energia”, é um processo de geração simultânea de potência, seja mecânica ou elétrica, e energia térmica a partir de uma única fonte de energia primária/combustível (FIOMARI, 2004). Nos próximos tópicos, serão tratados os princípios da cogeração de energia e sua caracterização no setor sucroalcooleiro, assim como os componentes fundamentais que compõem uma usina de açúcar e álcool.

3.1 FUNDAMENTOS GERAIS DA COGERAÇÃO DE ENERGIA

Esse processo é baseado no princípio da eficiência energética, buscando aproveitar ao máximo o potencial energético contido no combustível utilizado, ou seja, este sistema integrado aproveita o calor residual do processo de geração de energia para aquecer água e produzir o vapor que será utilizado para fins úteis, como por exemplo aquecimento, resfriamento ou fornecimento de vapor para os processos industriais da própria planta. Em sistemas de geração de energia convencionais este calor seria dissipado na atmosfera, resultando em uma perda considerável de energia (FIOMARI, 2004).

A eficiência energética da cogeração é medida pelo rendimento global do sistema, que é a proporção entre a energia útil fornecida (eletricidade e calor) e a energia contida no combustível inicial. Essa eficiência pode variar dependendo do tipo de sistema de cogeração, do tipo de combustível utilizado e das condições operacionais.

Esta técnica não só melhora a eficiência energética, como contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes, pois menos combustível é queimado para gerar a mesma quantidade de energia útil em comparação a produção de calor e potência em processos independentes.

A cogeração é especialmente relevante em indústrias que têm grandes demandas de calor e energia, já que é possível aumentar a produção sem causar grandes danos ao meio ambiente. Além disso, a potência elétrica gerada pode ser suficiente para o funcionamento integral da indústria, e seu excedente pode ser vendido no mercado livre de energia, fornecendo a empresa mais um produto em seu portfólio. No caso da venda de energia elétrica excedente para a concessionária, a usina deve investir em turbogeradores de grande eficiência e um sistema de controle mais robusto e dedicado.

Através de avanços contínuos em tecnologia e políticas de incentivo, espera-se que a cogeração se consolide como uma solução viável para a maximização da eficiência energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa. À medida que a transição para um sistema energético mais sustentável, a cogeração de energia desempenhará um papel cada vez mais significativo.

O setor elétrico brasileiro, que outrora se caracterizava pela estabilidade e gerência estatal, sofreu transformações significativas nos últimos anos. Essas mudanças são atribuíveis ao avanço tecnológico, à revisão de regulamentações e ao aumento dos incentivos que acompanharam a maior inserção do setor privado na geração de energia. O governo, confrontado com um cenário competitivo no setor elétrico, teve que lidar com indústrias que buscavam não só a autossuficiência, tornando-se independentes do sistema interligado nacional, mas também a monetização do excedente energético produzido em suas operações. Este novo paradigma desafiou a estrutura tradicional da rede elétrica, que foi concebida para distribuir energia sob um modelo de fornecimento e rentabilidade específico, agora compelida a integrar sistemas industriais de geração e reconhecer essas indústrias não mais apenas como consumidoras de energia, mas também como fornecedoras.

Para além das considerações econômicas - que sem dúvida requerem uma análise minuciosa - a inserção de novas cargas no sistema interligado nacional trouxe complexidades adicionais. Estas cargas podem introduzir variações no fator de potência da rede, desafiando a estabilidade do sistema. Em resposta, regulamentações e normas técnicas foram estabelecidas e reforçadas para assegurar que o sistema elétrico mantenha sua confiabilidade e estabilidade diante dessas novas dinâmicas de carga.

Com o objetivo de adaptar o setor elétrico a um mercado mais dinâmico e diversificado, o governo brasileiro instituiu órgãos reguladores e de gestão. Em 1996, foi estabelecida a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), seguida pelo surgimento do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e do Mercado Atacadista de Energia (MAE) em 1998. Além disso, em 2001, a criação da Câmara de Gestão da Crise Energética (CGCE) marcou uma resposta a desafios emergentes. Essas e outras entidades foram fundamentais na transição do sistema elétrico para um ambiente onde a concorrência e a negociação de energia em termos de mercado aberto se tornaram preponderantes em relação ao modelo anterior, dominado pelos consumidores cativos (FIOMARI, 2004).

Com o advento da crise energética causada pela dependência da rede elétrica nacional para com as usinas hidrelétricas nos anos de 2000 e 2001, que enfrentavam baixos níveis de armazenamento em seus reservatórios, surgiu-se a necessidade de pensar na inserção de novas

fontes de energia primária na Matriz Energética Nacional, desta forma o sistema interligado nacional se tornaria mais estável com meios complementares de geração de energia para rede (FIOMARI,2004).

Dado o cenário, o mercado de cogeração a partir de biomassa obteve incentivos significantes e vem crescendo exponencialmente desde então, estando dentro dele o setor sucroalcooleiro, o qual será detalhado no próximo tópico.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA COGERAÇÃO NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

A cogeração é especialmente relevante em indústrias que têm grandes demandas de calor e energia, como as usinas de açúcar e álcool, onde o bagaço, um subproduto da produção de cana-de-açúcar, é utilizado como combustível para gerar energia para a própria usina e, às vezes, para vender o excedente (FIOMARI, 2004).

No Brasil, e especialmente no estado de São Paulo, a maioria das usinas de açúcar e álcool é autossuficiente em termos de energia graças ao uso de bagaço para geração.

A cogeração se alinha com a sustentabilidade, pois o bagaço é uma fonte de energia renovável. O ciclo de utilização do bagaço permite que, conforme é consumido para gerar energia, novas plantações de cana sejam cultivadas, garantindo a reposição do insumo. Esta é uma vantagem sustentável distinta dos combustíveis fósseis como carvão, petróleo ou gás natural, que, uma vez utilizados, se esgotam definitivamente.

A cogeração de energia no setor sucroalcooleiro teve seu desenvolvimento impulsionado nas últimas décadas. No Brasil, país líder na produção de cana-de-açúcar, a cogeração ganhou destaque a partir dos anos 1980, quando começaram a ser adotadas tecnologias mais eficientes de queima do bagaço de cana (FIOMARI, 2004).

Dentro do setor sucroalcooleiro, a cogeração é implementada principalmente através de turbinas a vapor. O ciclo de vapor se inicia quando o bagaço da cana-de-açúcar é queimado para gerar calor que aquecerá uma caldeira contendo água, produzindo vapor superaquecido. Neste momento, tem-se energia térmica proveniente da combustão da biomassa.

Este vapor é expandido em uma turbina, transformando esta energia térmica, proveniente do calor emitido, em energia cinética, ou seja, o trabalho necessário para acelerar o vapor em repouso para que este adquira velocidade, que por sua vez provoca movimento ao girar o rotor desta turbina, transformando a energia cinética do movimento do vapor em energia mecânica.

O eixo desta turbina tem velocidade ω e aciona o rotor de um gerador síncrono que está acoplado a ela. O eixo deste gerador, que gira solidário ao eixo da turbina, transformará a energia

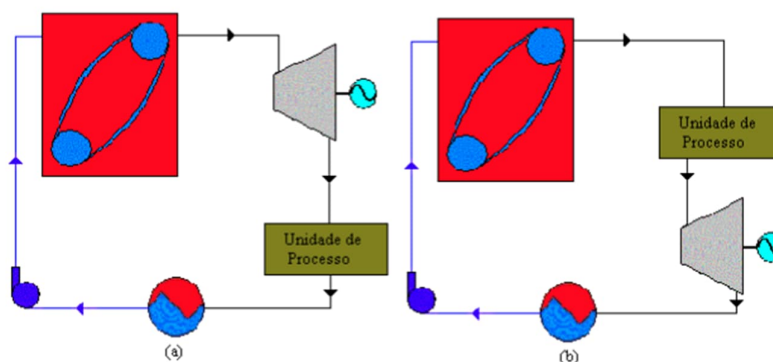
mecânica, ou seja, o torque, em energia elétrica, funcionando como um grande circuito eletromagnético que por meio de um campo magnético girante induzido no rotor da máquina produz um campo magnético no estator do gerador síncrono onde está localizada a armadura, induzindo uma corrente elétrica alternada. A tensão resultante na armadura, geralmente trifásica, que pode chegar à ordem de kV, possui uma frequência de 60 Hz, síncrona com a tensão e frequência da barra infinita (rede elétrica) a qual o gerador está conectado. Os sistemas são projetados para satisfazer a demanda térmica, sendo a energia elétrica produzida usada internamente ou vendida, contribuindo para a autossuficiência energética da usina.

Essas turbinas podem operar em diferentes configurações, como contrapressão, combinação de contrapressão com condensação, e extração-condensação. O vapor gerado nessas turbinas é utilizado tanto para acionamentos mecânicos quanto para a produção de eletricidade, e o vapor excedente, chamado "vapor de escape", é utilizado como reservatório térmico no processamento do caldo de cana. A produção de energia atende tanto às necessidades mecânicas quanto aos processos de produção da própria usina (FIOMARI, 2004).

Antes da cogeração se tornar comum, as usinas usavam turbinas de baixa eficiência que eram adequadas ao balanço térmico das plantas, mas não eram eficientes em termos de produção de energia elétrica. Com o passar do tempo e a necessidade de otimização, as usinas passaram a adotar turbinas de múltiplos estágios e geradores elétricos mais eficientes, reduzindo assim o consumo de vapor de processo e aumentando a produção de eletricidade para venda (FIOMARI, 2004).

Existem dois tipos de ciclos de cogeração que são definidos pela ordem de produção das formas de energia eletromecânica e térmica, ou seja, o processo sequencial de geração de eletricidade e consumo de energia térmica útil, conforme apresentado na Figura 3 (FIOMARI, 2004).

Figura 3 - Ciclos *topping* (a) e *bottoming* (b).



Fonte: (FIOMARI, 2004).

Predominantemente adotado, especialmente na indústria sucroalcooleira, é o ciclo *topping*. Nesse arranjo, o vapor é primeiramente empregado na geração de eletricidade, e o calor remanescente é então recuperado para uso nos processos da indústria. Alternativamente, nos ciclos *bottoming*, o calor excedente de operações industriais que requerem temperaturas elevadas é direcionado para gerar eletricidade, um método usual em plantas químicas. A Figura 3 demonstra esquematicamente ambos os ciclos *topping* (a) e *bottoming* (b) (FIOMARI, 2004).

Além da já mencionada geração de eletricidade que pode ser utilizada internamente ou vendida, o vapor que sai das turbinas, conhecido como “vapor de escape”, é particularmente valioso para o processo. Esse vapor é empregado em operações que não exigem temperaturas elevadas, o que justifica a adoção do ciclo *topping* nas usinas de açúcar e álcool. Essas operações dependem essencialmente de vapor saturado ou de uma condição muito próxima a essa, pois é durante o processo de condensação que o vapor libera a maior parte de sua energia latente (FIOMARI, 2004).

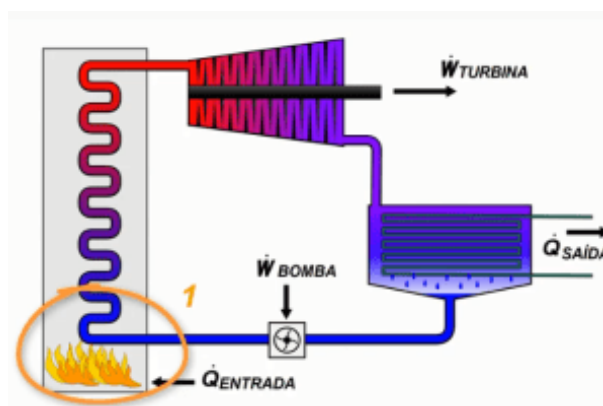
A engenharia por trás do gerador síncrono possibilita a transformação de energia mecânica em energia elétrica. No entanto, a turbina é um componente igualmente importante, tendo uma complexa construção e um robusto sistema de controle, que está muitas vezes relacionado ao controle de toda a planta, conhecido pela sigla D.C.S do inglês “*distributed control system*”, que inclusive monitora muitas vezes o próprio gerador. Através de comandos provenientes do controlador responsável pela regulação de tensão do gerador, o sistema de controle distribuído consegue monitorar em tempo real o estado da máquina de uma sala de controle onde operador consegue em múltiplas telas ter o mesmo controle sobre as outras máquinas da planta, como caldeiras, turbinas, motores etc. No próximo tópico, aborda-se alguns dos componentes principais da usina do ponto de vista da cogeração de energia, especialmente a turbina a vapor.

3.3 ESTRUTURA E COMPONENTES DA COGERAÇÃO NA USINA SUCROALCOOLEIRA

Dentro de um sistema de cogeração em uma usina sucroalcooleira, diversos componentes trabalham em conjunto para otimizar a produção de energia.

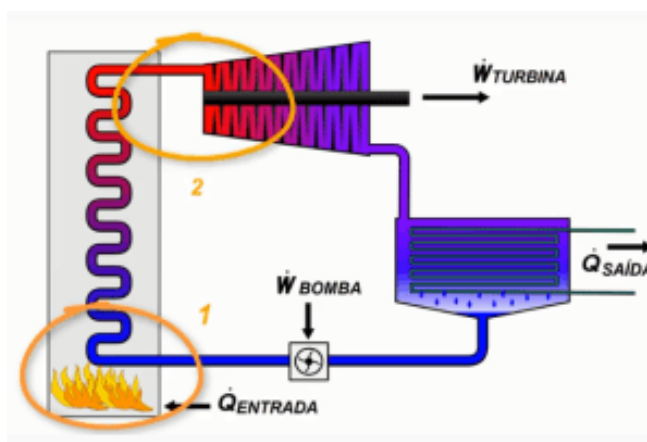
Nas Figuras 4, 5 e 6 é possível analisar o ciclo do vapor, desde sua geração até o produto final: energia elétrica a partir do torque gerado no eixo do gerador.

Figura 4 - Vapor gerado na caldeira para alimentar a turbina a vapor.



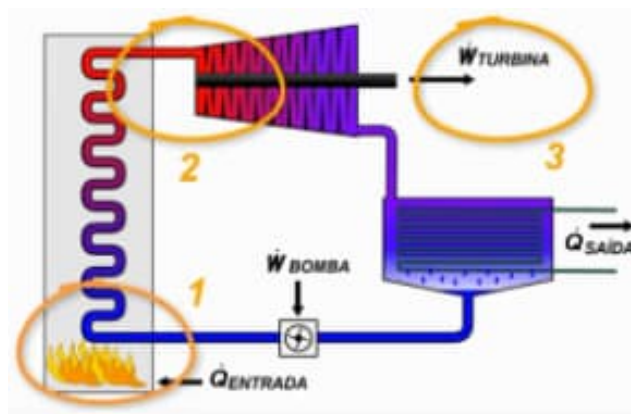
Fonte: (WYLEN, 2003).

Figura 5 - Saída do vapor da caldeira e entrada do vapor na admissão da turbina a vapor.



Fonte: (WYLEN, 2003).

Figura 6 - Movimento de rotação do eixo da turbina a vapor girando o eixo do gerador elétrico / redutor.



Fonte: (WYLEN, 2003).

As caldeiras são os equipamentos onde a biomassa, no caso o bagaço de cana, é queimada para gerar calor, que por sua vez produz vapor de água em alta pressão e temperatura.

As turbinas a vapor utilizam o vapor gerado nas caldeiras para produzir energia mecânica, que é convertida em energia elétrica através de um gerador síncrono acoplado.

As turbinas a vapor desempenham um papel crítico nos sistemas de geração de energia e podem ser diferenciadas por uma série de características operacionais e de design. A orientação do fluxo de vapor em relação ao rotor é um dos principais critérios de classificação. Nas turbinas axiais, o vapor flui paralelamente ao eixo do rotor e são as mais prevalentes na indústria. As turbinas radiais, por outro lado, direcionam o vapor perpendicularmente ao eixo, enquanto nas turbinas tangenciais, o vapor se move ao longo de um caminho que é tangente ao rotor (PEXE, 2020).

Além da direção do fluxo, as turbinas também são categorizadas pela maneira como o vapor interage com o rotor. Nas turbinas de ação, o vapor expande-se exclusivamente nos componentes fixos, como as pás guia e os bocais, sem alterar a pressão ao longo dos lados do rotor. Em contraste, as turbinas de reação permitem que o vapor se expanda dentro do próprio rotor, resultando em uma queda de pressão do início ao fim do rotor. Existem também designs mistos, que combinam características das turbinas de ação e reação.

A configuração do escalonamento do rotor oferece outra forma de diferenciação. As turbinas podem ter um único rotor ou múltiplos rotores, e, dependendo do design do escalonamento, podem ser classificadas como turbinas de escalonamento de velocidade, de pressão, ou uma combinação de ambos. Esse escalonamento influencia a eficiência e o desempenho da turbina em diferentes condições operacionais.

Outro critério de classificação está relacionado ao padrão de admissão do vapor. As turbinas de admissão total recebem vapor em todas as pás do distribuidor, enquanto as de admissão parcial têm vapor impactando apenas uma seção das pás. Essa característica é importante para o controle da carga e da eficiência da turbina.

A condição do vapor após passar pela turbina também serve como um critério de classificação. As turbinas de escape livre expõem o vapor diretamente para a atmosfera, operando na pressão atmosférica. Este parâmetro é vital para aplicações onde a pressão do vapor de escape pode ser utilizada para outros processos ou deve ser controlada para evitar impactos no meio ambiente. Turbinas combinadas representam uma abordagem híbrida onde parte do vapor é extraída para aplicações de aquecimento, enquanto o restante passa pela turbina e segue para a atmosfera ou para um condensador.

Adicionalmente, o estado do vapor na entrada das turbinas é crucial, variando de vapor vivo, diretamente da caldeira, que pode ser saturado ou superaquecido, até vapor de escape, oriundo de

outra máquina térmica. Geralmente, as turbinas que utilizam vapor de escape operam com vapor saturado (PEXE, 2020).

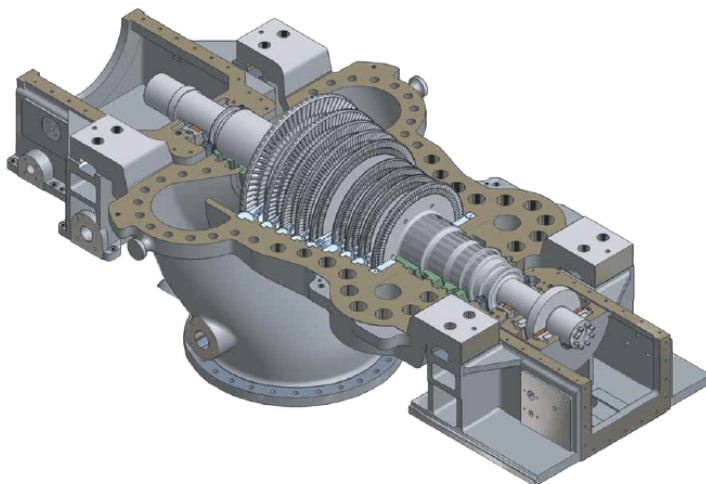
Cada um desses tipos de turbinas a vapor é projetado para atender a requisitos específicos de operação e eficiência, dependendo das necessidades da planta de energia ou do processo industrial em que estão instalados. A escolha da turbina adequada é, portanto, crucial para otimizar o desempenho e a eficiência do sistema de cogeração de uma usina sucroalcooleira.

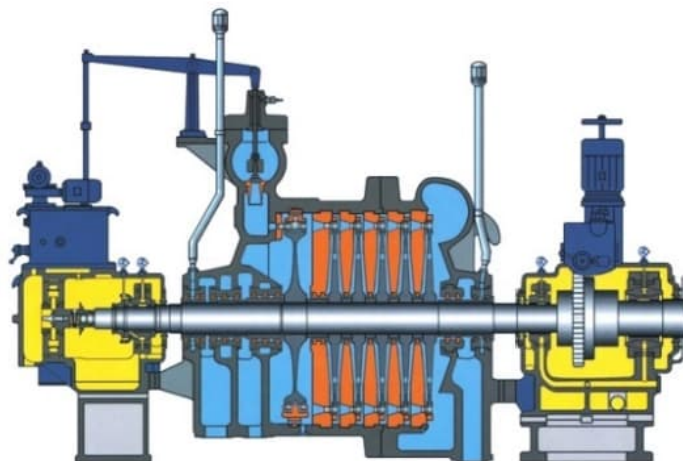
A forma como o vapor é descarregado dessas turbinas é um dos critérios chave para sua classificação. As turbinas de contrapressão, Figura 7, liberam o vapor a pressões que excedem a pressão atmosférica. Esse tipo de turbina é valioso em aplicações onde o vapor de saída ainda pode ser utilizado em outros processos industriais ou de aquecimento.

Outro modelo importante é a turbina de condensação e extração, apresentada na Figura 8. Esta turbina aceita vapor a alta pressão e, através de um ou mais estágios entre a entrada e a saída, permite a extração de vapor a uma pressão definida para uso em processos, enquanto o vapor restante é expandido até a pressão do condensador, alcançando valores baixos. Essa configuração é particularmente eficiente, pois maximiza o uso do vapor em diversos pontos de sua expansão.

Por último, a turbina de condensação (Figura 9) caracteriza-se por descarregar todo o vapor a uma pressão abaixo da atmosférica. Esta abordagem é comum em sistemas onde o vapor exaurido é inteiramente condensado e recirculado, minimizando as perdas de energia e maximizando a eficiência do ciclo.

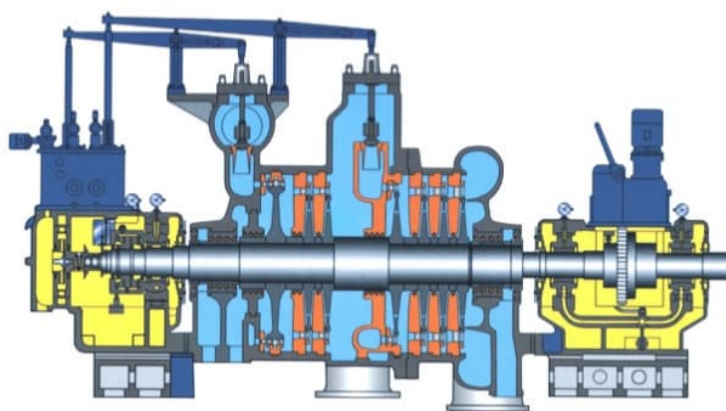
Figura 7 - Turbinas a vapor de contrapressão.





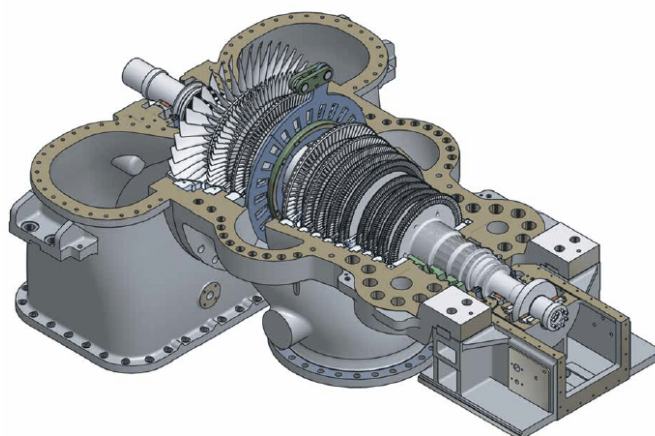
Fonte: (PEXE, 2020).

Figura 8 - Turbinas de condensação com extração.



Fonte: (PEXE, 2020).

Figura 9 - Turbinas a vapor de condensação.



Fonte: (PEXE, 2020).

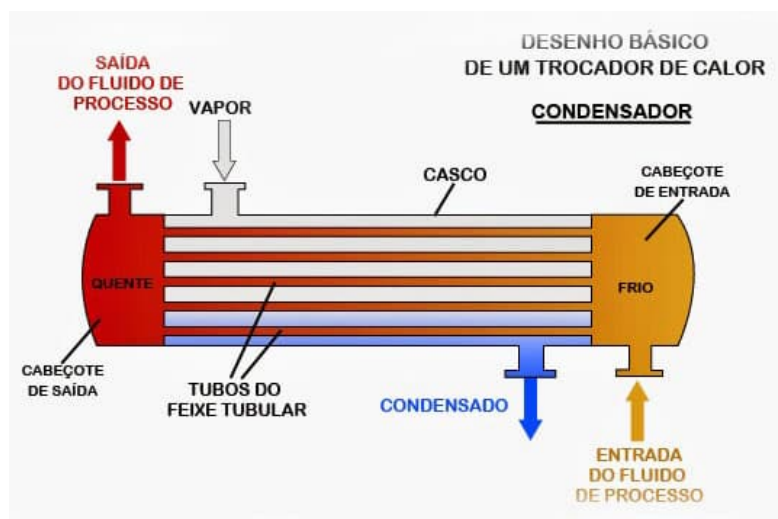
A partir das Figuras 7 e 9, consegue-se visualizar grandes diferenças construtivas entre as turbinas de contrapressão e condensação. Apesar de não ser um trabalho de graduação focado neste tópico, é importante citar, mesmo que superficialmente, a importância e complexidade desta máquina primária. A engenharia por trás da construção e do controle da turbina a vapor é um espetáculo à parte. A Figura 8 consiste em uma representação da turbina de condensação com extração, a fim de fornecer aos leitores uma referência visual simples, porém didática.

A eficiência de uma turbina a vapor, determinada pela proporção de energia mecânica gerada no eixo em comparação com a energia térmica resultante da variação da entalpia do vapor, varia conforme o modelo da turbina e a demanda operacional imposta a ela, como foi possível analisar anteriormente. Quando o vapor de entrada possui temperaturas e pressões mais altas, há um aumento correspondente na produção de energia mecânica por quantidade de vapor que se condensa. Contudo, essas condições operacionais de alta temperatura e pressão são restringidas pelas capacidades tecnológicas das caldeiras e materiais envolvidos.

Após passar pela turbina, o vapor é condensado nesses equipamentos, transformando-se novamente em água, que pode ser recirculada para as caldeiras.

Os trocadores de calor, exemplificados pela Figura 10, recuperam o calor do vapor de escape e o reaproveitam em diferentes processos dentro da usina, como o aquecimento de fluidos ou pré-aquecimento de ar para combustão.

Figura 8 - Desenho básico de um trocador de calor.



Fonte: (LIMA, BARROSO e BARROS, 2014).

Os geradores síncronos são dispositivos que convertem a energia mecânica proveniente das turbinas em energia elétrica e serão vistos com maiores detalhes no próximo capítulo.

Os sistemas de controle englobam os instrumentos e softwares que monitoram e regulam o processo de cogeração, assegurando a eficiência e segurança operacional.

Equipamentos auxiliares incluem bombas, válvulas, filtros, e outros dispositivos que suportam as operações principais do sistema de cogeração.

Quanto à integração da energia gerada à rede elétrica, o processo é gerido de forma a equilibrar a produção e o consumo de energia em cada ponto da usina. A transmissão de energia elétrica é determinada para atender à demanda, considerando as perdas em cada barra do sistema interligado.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) do Brasil é uma organização privada sem fins lucrativos, estabelecida em 1998, que gerencia a operação das instalações de geração e transmissão de energia no Sistema Interligado Nacional. Com supervisão da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), o ONS assegura a coordenação e controle das atividades do setor. Notavelmente, a maior parte do financiamento do ONS provém de tarifas de energia, representando 97% do orçamento, enquanto apenas 3% são cobertos por empresas do setor elétrico, e a Aneel tem a responsabilidade de monitorar a utilização desses fundos (ONS).

Além disso, a reestruturação do setor elétrico brasileiro incluiu a criação do Mercado Atacadista de Energia (MAE), facilitando a negociação de energia elétrica.

Em resumo, a cogeração nas usinas sucroalcooleiras representa um sistema complexo e integrado, que não só produz energia de forma eficiente como também contribui para a estabilidade e sustentabilidade da rede elétrica nacional.

4 GERADORES SÍNCRONOS

Os geradores síncronos ou geradores de corrente alternada se referem a dispositivos que tem como característica o tipo de corrente elétrica produzida pelo gerador e a característica de sincronia destes dispositivos com a rede elétrica à qual estão conectados.

4.1 INTRODUÇÃO À MÁQUINAS ELÉTRICAS

Máquinas elétricas rotativas podem assumir várias formas e receber diferentes denominações, como de corrente contínua (CC), síncronas, de ímã permanente, de indução, de relutância variável, de histerese, sem escovas, entre outras. Apesar das aparências e aplicações diversas dessas máquinas, os princípios físicos que regem o seu funcionamento são notavelmente semelhantes. Portanto, é frequentemente vantajoso abordá-las sob uma perspectiva física unificada (UMANS, 2014).

Ao analisar uma máquina CC, observa-se que tanto o rotor quanto o estator possuem distribuições fixas de fluxo magnético no espaço, e a capacidade da máquina CC de gerar torque está relacionada à tendência desses fluxos se alinharem. As máquinas de indução, apesar das diferenças fundamentais, operam de acordo com o mesmo princípio. É possível identificar distribuições de fluxo associadas ao rotor e ao estator. Embora não sejam estacionárias e, na verdade, girem em sincronia, assim como no motor CC, essas distribuições de fluxo mantêm um ângulo constante entre si, sendo o torque gerado pela tendência dessas distribuições a se alinharem.

Em resumo, embora as máquinas elétricas rotativas possam variar amplamente em termos de design e aplicação, a base física de seu funcionamento é notavelmente similar.

O material ferromagnético em máquinas elétricas é vital para moldar campos magnéticos, que são fundamentais na transferência e conversão de energia. Em muitas máquinas rotativas, o aço elétrico é usado para criar o estator e o rotor, com enrolamentos em ranhuras específicas (UMANS, 2014).

O aço elétrico, por ser altamente permeável, otimiza a interação entre bobinas e aumenta a densidade de energia magnética. Isso dá liberdade aos projetistas para personalizar campos magnéticos conforme as necessidades de cada máquina (UMANS, 2014).

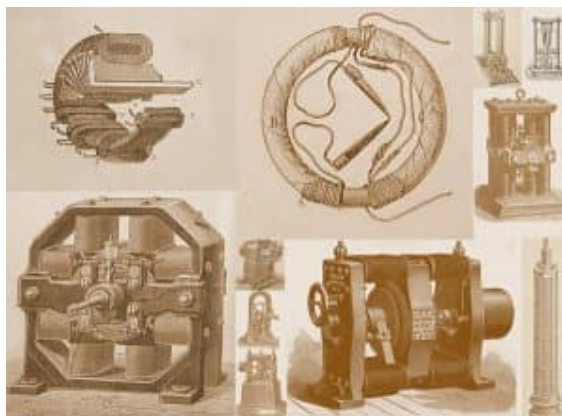
No entanto, o fluxo de tempo variável na estrutura da armadura pode gerar correntes parasitas no aço elétrico, prejudicando o desempenho da máquina e até mesmo podendo danificá-la. Para minimizar esse problema, frequentemente usam-se finas chapas de aço elétrico, isoladas entre si, na construção da estrutura da armadura da máquina.

Na Figura 11 é possível visualizar representações das primeiras máquinas elétricas. Embora muitos dos conceitos que serão abordados neste trabalho de graduação sejam hoje considerados triviais, é essencial lembrar o árduo percurso percorrido pelos cientistas no desenvolvimento da eletricidade. Com o intuito de preservar essa rica história e compartilhá-la com todos os interessados, a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), com o apoio da FAPERJ através do edital de Difusão e Popularização da Ciência e Tecnologia no Estado do Rio de Janeiro, criou o Museu Histórico Virtual de Máquinas Elétricas, o qual pode ser acessado gratuitamente pela internet (MOTTA, 2011).

O projeto é liderado por José Carlos de Oliveira, professor do Laboratório de Novas Tecnologias para o Ensino da Engenharia Elétrica (Lanteg/UFRJ). O museu eletrônico reúne informações sobre as biografias e as obras de 71 inventores que desempenharam um papel fundamental na criação dos principais dispositivos eletromecânicos entre 1820 e 1890, que serviram de base para a tecnologia atual das máquinas elétricas (MOTTA, 2011).

O objetivo desse esforço conjunto é tornar o conhecimento acadêmico sobre o tema mais acessível a todos, sendo uma oportunidade extremamente fascinante para curiosos e estudantes de máquinas elétricas.

Figura 9 – Protótipos de máquinas elétricas: pioneirismo no século XIX. Acervo museu virtual.



Fonte: (MOTTA, 2011).

A energia elétrica está presente em todas as partes de nossa vida diária e é um importante alicerce da sociedade. Encontra-se máquinas elétricas em quase todos os locais de trabalho, onde os motores funcionam principalmente com eletricidade. Prédios educacionais e de escritórios, bem como grande parte da infraestrutura das cidades, dependem principalmente da energia elétrica como fonte de energia. Nas residências, os aparelhos elétricos, como máquinas de lavar, fornos ou aspiradores de pó, dependem da eletricidade, mas também o abastecimento de água ou o

aquecimento não funcionam sem ela. No futuro, a demanda por energia elétrica aumentará ainda mais, pois cada vez mais aparelhos passarão a usar eletricidade em vez de outras fontes de energia. Um exemplo é a tendência de usar motores elétricos em substituição aos motores de combustão.

A principal tarefa dos sistemas de energia é fornecer eletricidade aos consumidores. Os diferentes consumidores podem variar em escala, desde grandes plantas industriais até pequenas residências particulares.

É possível estudar a energia elétrica de vários âmbitos, desde sua geração, a transmissão e distribuição até culminar-se na energia elétrica que é consumida pelas residências. Neste capítulo, aprofunda-se no componente central da geração de energia, ou seja, em como o princípio da geração de energia a partir de indução de campos magnéticos define a construção e funcionamento dos geradores síncronos, máquinas que se destacam por sua complexidade e engenhosidade fascinante.

A intenção é que se realize uma análise que não apenas transmita a magnitude da complexidade técnica envolvida, mas também cultive no leitor um apreço similar pelo tema que tem inspirado profundamente este estudo.

4.2 PRINCÍPIOS DO ELETROMAGNETISMO NAS MÁQUINAS ELÉTRICAS

Estudantes de engenharia elétrica frequentemente têm conhecimento das equações de Maxwell do eletromagnetismo, mas para compreender a conversão de energia em geradores síncronos, as técnicas de análise de circuitos magnéticos, que são simplificações dessas equações, são mais relevantes. Neste contexto, não é fundamental um entendimento profundo das equações de Maxwell. Para os sistemas tratados aqui, as frequências e tamanhos envolvidos permitem desconsiderar termos relacionados à radiação eletromagnética, focando nas relações entre campos magnéticos e correntes que produzem esses campos (UMANS, 2014).

$$\oint_C H dl = \int_S J \cdot da , \quad (1)$$

$$\oint_S B \cdot da = 0 . \quad (2)$$

A Equação (1), conhecida como Lei de Ampère, estabelece que a integral de linha da componente tangencial do campo magnético H ao longo de uma curva fechada C é igual à corrente total que atravessa qualquer superfície S delimitada por essa curva. Essencialmente, ela relaciona a origem do campo magnético H à densidade de corrente J (UMANS, 2014).

Imagina-se uma região com um campo magnético e uma espira., onde as linhas do campo magnético atravessam esta espira, e dl representa pequenos segmentos tangentes a ela. Calculando-se o produto escalar desses elementos e somando-se para toda a espira, obtém-se o valor da primeira integral. Devido à orientação variável de H em relação a dl (hora perpendicular, hora antiparalelo, hora paralelo etc.), o produto escalar pode ser positivo, negativo ou nulo. No entanto, a Lei de Ampère estabelece que o resultado é precisamente a corrente total que atravessa a superfície cuja borda, neste caso, é a própria espira.

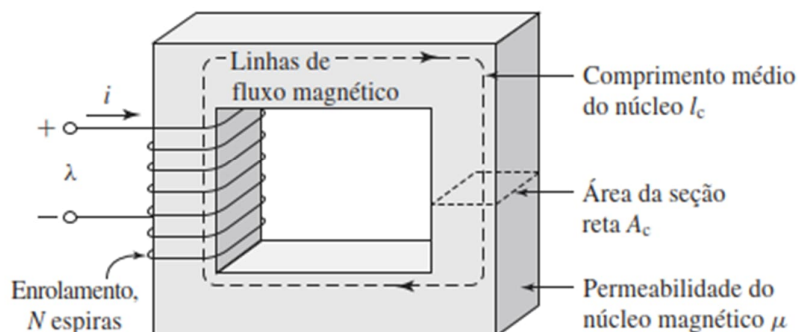
A Equação 2, chamada de Lei de Gauss para campos magnéticos, estabelece que a densidade de fluxo magnético B é conservada. Isso significa que, em uma superfície fechada, não há entrada líquida nem saída de fluxo magnético. Isso implica que não existem cargas magnéticas monopulares, ou seja, fontes isoladas de campo magnético, uma vez que todo campo magnético é gerado por dipolos magnéticos, como ímãs com um polo norte e um polo sul.

Essa lei estabelece que o fluxo magnético total que entra ou sai de uma superfície fechada é sempre zero. Isso significa que qualquer fluxo que entre em uma superfície delimitando um volume deve sair desse volume passando por outra região da superfície, porque as linhas de fluxo magnético formam circuitos fechados.

A partir de (1) e (2), pode-se concluir que as propriedades de um campo magnético podem ser determinadas com base nos valores instantâneos das correntes que o geram, e que quaisquer mudanças no tempo nos campos magnéticos são diretamente resultantes de mudanças no tempo nas fontes que os produzem (UMANS, 2014).

Uma segunda suposição simplificadora envolve o conceito de circuito magnético, conforme a Figura 12. Em situações práticas, como na análise de várias máquinas elétricas, resolver o problema tridimensional da intensidade do campo magnético H e da densidade de fluxo magnético B em estruturas geometricamente complexas pode ser extremamente desafiador. Porém, frequentemente pode-se simplificar o problema para um circuito equivalente unidimensional, oferecendo-se soluções com precisão aceitável em engenharia, tornando a análise mais viável.

Figura 10 - Circuito magnético simples. λ é o fluxo concatenado do enrolamento.



Fonte: (UMANS, 2014).

Um circuito magnético é formado principalmente por material magnético de alta permeabilidade. Esse material direciona o fluxo magnético φ ao longo da estrutura, de forma semelhante à como os condutores conduzem correntes em um circuito elétrico. Isso ajuda a manter o fluxo magnético φ confinado aos caminhos da estrutura (UMANS, 2014).

Devido à alta permeabilidade do núcleo magnético, uma solução exata revelaria que o fluxo magnético φ é praticamente confinado ao núcleo. Além disso, as linhas de campo seguem o trajeto definido pelo núcleo e a densidade de fluxo B é uniforme em qualquer seção transversal devido à uniformidade da área. O campo magnético pode ser representado pelas linhas de fluxo que formam circuitos fechados interligados com o enrolamento (UMANS, 2014).

No centro do circuito magnético da Figura 13, há um núcleo, e a fonte do campo magnético nesse núcleo é representada pelo produto de N (número de espiras) e i (corrente elétrica em ampères) do enrolamento da bobina. Isso é chamado de força magnetomotriz (FMM) e é uma medida da capacidade do circuito em fornecer um campo magnético e a unidade de medida no SI é ampère-espira (Ae) (UMANS, 2014).

$$\varphi = \int_s B \cdot da . \quad (3)$$

A unidade de medida do fluxo magnético φ no SI é o weber (Wb). Portanto, ao medir-se a intensidade do campo magnético em teslas (T) e a área em metros quadrados (m^2), o fluxo magnético será expresso em webers (Wb). O weber é, portanto, uma unidade que quantifica a quantidade de campo magnético que atravessa uma superfície, como é possível ver em (3), e desempenha um papel importante na descrição do comportamento magnético em várias aplicações (UMANS, 2014).

Conhecida como lei de Faraday, (4) explica o fenômeno do campo magnético variando no tempo e resultando em um campo elétrico no espaço (UMANS, 2014).

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} . \quad (4)$$

A Equação (4), sendo uma das equações de Maxwell, estabelece uma relação entre a intensidade de campo elétrico E ao longo de um contorno fechado C e a variação do fluxo magnético que atravessa esse contorno ao longo do tempo. Em contextos em que os enrolamentos possuem alta condutividade elétrica, o campo elétrico no fio é tão pequeno que se pode ignorá-lo. Portanto, o primeiro termo da equação é simplificado e equivale à tensão induzida nos terminais do enrolamento (UMANS, 2014).

Além disso, no segundo termo da equação, o fluxo do núcleo φ é o fator predominante. Como o enrolamento (e, conseqüentemente, o contorno C) envolve o fluxo do núcleo N vezes, (4) pode ser representada de forma mais concisa e prática por (5), considerando essas simplificações (UMANS, 2014).

Essencialmente, (5) descreve a relação entre a variação no tempo do fluxo magnético φ e a tensão induzida e nos enrolamentos em circuitos magnéticos. Essa definição possui grande importância para o entendimento do funcionamento dos dispositivos descritos neste trabalho de graduação (UMANS, 2014).

$$e = N \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} . \quad (5)$$

O fluxo concatenado do enrolamento λ é definido pelo produto do fluxo e número de espiras, como é possível visualizar em (6), e é medido em webers (ou de forma equivalente em webers-espiras). Utiliza-se o símbolo ϕ para indicar o valor instantâneo de um fluxo magnético φ variável no tempo (UMANS, 2014).

$$\lambda = N\varphi . \quad (6)$$

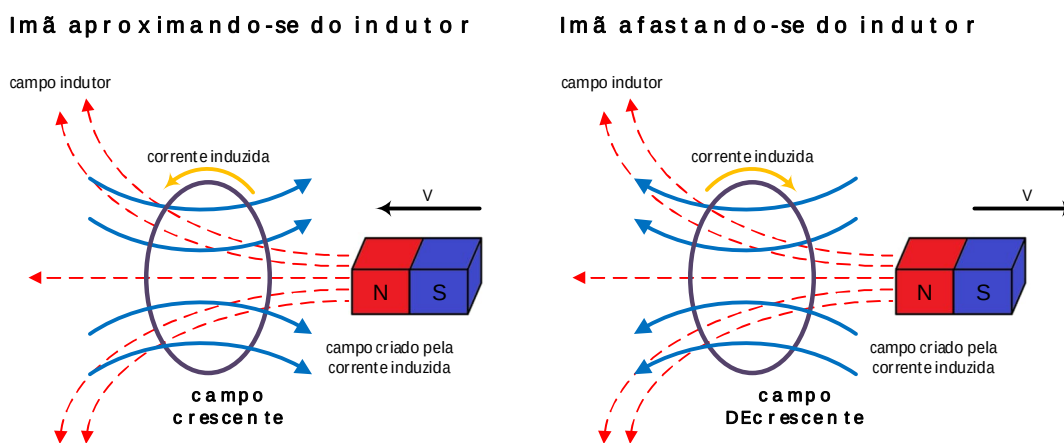
Outra observação importante sobre a (4) é que se estabelece que a tensão induzida é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético que atravessa o contorno do enrolamento (UMANS, 2014).

Ao considerar-se o que acontece quando os terminais do enrolamento são curto-circuitados, ou seja, conectados diretamente para formar um circuito fechado, percebe-se que a tensão induzida no enrolamento causa a circulação de corrente elétrica. (UMANS, 2014).

Nessa situação, a direção dessa corrente é determinada pela regra da mão direita de Faraday, que afirma que a corrente fluirá em uma direção que se opõe à variação do fluxo magnético que está ocorrendo. Em outras palavras, a corrente gerada pelo curto-circuito cria um campo magnético que se opõe à mudança do campo magnético original. Esse fenômeno é representado pelo sentido negativo da tensão induzida na equação (UMANS, 2014).

Essa é uma consequência da Lei de Faraday e do princípio de conservação da energia, representado por meio da Lei de Lenz. A Lei de Faraday diz que quando há uma mudança no fluxo magnético através do enrolamento, a tensão induzida age para criar uma corrente que gera um campo magnético que se opõe a essa mudança. Já por meio da Lei de Lenz, uma das consequências da Lei de Faraday, pode-se concluir que a energia não pode ser criada nem destruída no processo de geração de corrente elétrica por indução eletromagnética. Na Figura 13 é demonstrado perfeitamente este fenômeno de forma simples e didática (UMANS, 2014).

Figura 11 - Exemplificação da Lei de Faraday e Lenz.



Fonte: Elaboração própria.

Em outras palavras, se o fluxo magnético através de um circuito aumenta, a corrente induzida no circuito fluirá de tal forma que cria um campo magnético oposto a essa mudança, tentando evitar que o fluxo aumente ainda mais. Se o fluxo magnético através de um circuito diminui, a corrente induzida no circuito fluirá de tal forma que cria um campo magnético na mesma direção da mudança, tentando impedir que o fluxo diminua ainda mais (UMANS, 2014).

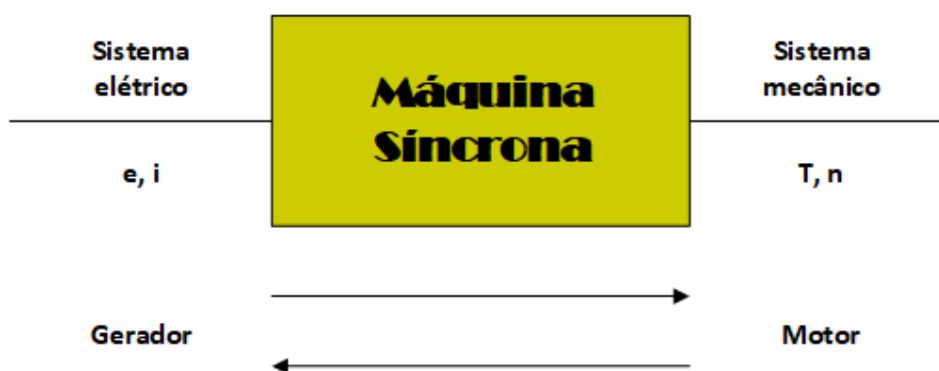
Esse fenômeno é fundamental para se entender o funcionamento de dispositivos eletromagnéticos, como geradores e transformadores, onde a variação do fluxo magnético é usada para gerar corrente elétrica ou tensão, além disso, essas leis desempenham um papel fundamental na compreensão de como a eletricidade é gerada em circuitos a partir de mudanças no campo magnético e é um dos pilares da teoria eletromagnética. Atualmente a produção de energia elétrica em larga escala é feita através da indução eletromagnética (UMANS, 2014). Estes conceitos são retomados e detalhados para a aplicação específica de geradores síncronos.

4.3 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS GERADORES SÍNCRONOS

As máquinas síncronas podem ser geradoras ou motores. Aborda-se neste trabalho as máquinas de corrente alternada, chamadas máquinas síncronas, especialmente do gerador síncrono.

Essas máquinas são, essencialmente, conversores eletromecânicos de energia. Como é possível visualizar a partir da Figura 14, quando a máquina é um gerador, uma potência mecânica é fornecida por uma máquina primária, sendo esta potência mecânica o resultado da velocidade e do torque desta máquina primária, e na saída terem-se tensão e corrente, além das perdas. Quando a máquina é um motor, é necessário fornecer na entrada tensão e corrente, como resultado tem-se na saída velocidade e torque, além das perdas.

Figura 12 - Conversores eletromecânicos de energia.

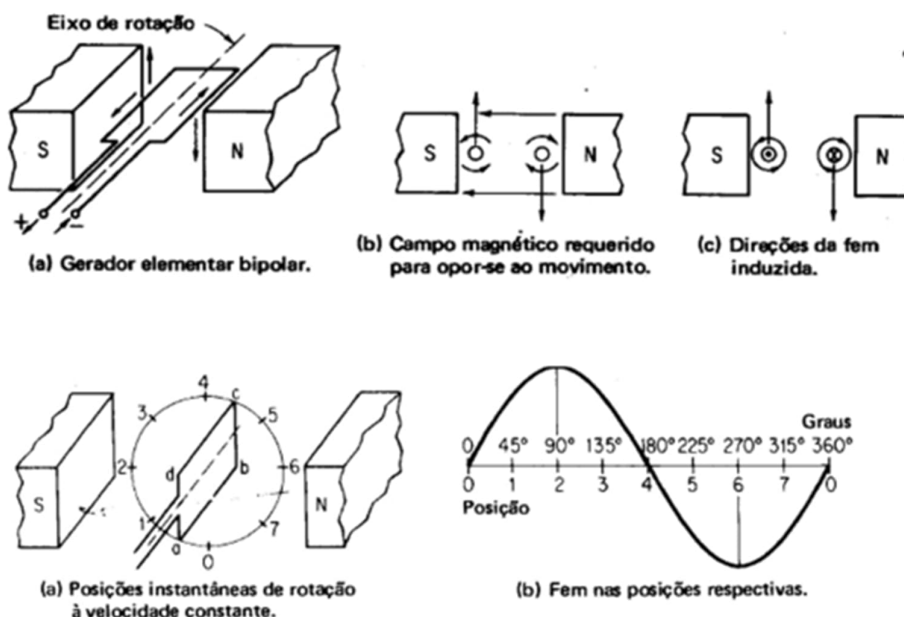


Fonte: Elaboração própria.

O gerador síncrono é uma máquina de corrente alternada, sendo que esta se divide em dois tipos: máquinas síncronas e máquinas de indução. A diferença principal entre estas duas máquinas está na corrente induzida nos enrolamentos do rotor. No caso das máquinas síncronas, estas correntes são geradas diretamente na parte estacionária da máquina, ou seja, no estator, através de contatos rotativos. Já nas máquinas de indução, estas correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor através de um conjunto de fatores: variação no tempo, das correntes do estator e da movimentação do rotor em relação ao estator.

Entender o gerador síncrono através de um gerador elementar como ilustrado na Figura 15 é uma forma mais fácil de analisar esta máquina. Têm-se um campo constante CC e uma turbina que faz este enrolamento girar e, conforme gira, induz uma corrente com uma forma de onda senoidal. Se a velocidade de giro aumentar, essa senoide terá uma frequência maior, caso diminua, o sinal terá uma frequência menor.

Figura 13 - Força eletromotriz gerada por uma bobina móvel num campo uniforme.



Fonte: (KOSOW, 1919).

Estes geradores operam em sincronia com a frequência da rede elétrica, o que significa que a velocidade de rotação do gerador é controlada de forma que o número de rotações por minuto corresponda à frequência da rede elétrica. Isso é essencial para garantir a geração de eletricidade em fase com a rede e manter a estabilidade da distribuição elétrica, um dos motivos principais do porquê as máquinas síncronas são tão usadas no setor de geração de energia é justamente a facilidade de controlar a velocidade e sincronizar a sua frequência com a da rede.

Estes dispositivos também possuem como característica a geração de corrente alternada (CA), um tipo de corrente elétrica que alterna periodicamente a direção do fluxo de elétrons.

No âmbito global dos sistemas de energia, prevalece a utilização da corrente alternada (CA), caracterizada pela variação no tempo de tensão e corrente, oscilando entre extremos positivos e negativos, sendo a forma de onda chamada de onda senoidal. A magnitude da onda senoidal parte do zero até o pico, voltando ao zero e alcançando um pico negativo equivalente. O valor de pico representa a amplitude máxima da onda.

Em termos práticos, a tensão é frequentemente expressa como valor eficaz ou *RMS* (do inglês “*Root Mean Square*”), correspondendo a uma grandeza constante que, ao ser aplicada a um resistor, dissipa a mesma energia que a tensão variável original. O cálculo do valor *RMS* para uma onda senoidal se dá pela divisão do pico pela raiz quadrada de dois. A frequência do sinal determina a duração de um ciclo completo; por exemplo, em uma rede de 50 *Hz*, um ciclo tem duração de 20 milissegundos.

A transmissão da energia exige um circuito com dois condutores: um para o fluxo da corrente da fonte para a carga e outro para seu retorno.

Desde a invenção dos sistemas de potência, não somente uma tensão e corrente com formas de onda senoidais foram usadas, também referidas como "monofásicas", ou seja, somente uma fase de ida e volta de uma corrente, mas devido à construção de geradores, foi mais eficiente produzir três tensões diferentes, todas com formas de onda senoidais.

Um sistema CA trifásico se diferencia pelo uso de três condutores, cada um conduzindo uma das fases, permitindo a transmissão de três vezes mais potência em comparação com sistemas monofásicos. As vantagens incluem a alta eficiência na transferência de potência, simplicidade construtiva e a constância do fluxo de energia. Mesmo com a falha de uma ou duas fases, o sistema mantém uma capacidade limitada de transmissão de energia.

Na década de 1890, a emergente Westinghouse Company explorou a corrente alternada (CA), juntamente a Nikola Tesla, precursor no desenvolvimento do motor de indução CA polifásico e de um sistema elétrico completo baseado nesta tecnologia, que trouxe avanços significativos que superaram os desafios dos geradores de corrente contínua (CC). As vantagens da CA, como a eficiência dos transformadores em alterar níveis de tensão e corrente, a simplicidade dos geradores CA comparados aos CC e a economia dos motores CA, foram decisivas para que se adotasse esta utilização (PESSOA, 2011).

Com a padronização em CA, o conceito de geração centralizada ganhou força, e as distâncias até as cargas remotas deixaram de ser um obstáculo. A iluminação elétrica, com sua luz amarelada suave, superou rapidamente a iluminação a gás em conveniência e custo, impulsionando a adesão de consumidores às redes elétricas. À medida que mais clientes eram agregados, e o aumento da demanda era atendido sem elevação proporcional dos investimentos, o custo unitário da energia reduziu, atraindo ainda mais consumidores. As companhias de eletricidade expandiram-se até se encontrarem, e, por volta de 1920, cada centro de carga na Europa Ocidental já possuía seu sistema energético próprio. A interconexão desses sistemas foi vislumbrada como vantajosa, permitindo a otimização da geração de energia. Contudo, a diversidade de frequências utilizadas apresentava um desafio técnico, exigindo equipamentos conversores de frequência onerosos, o que motivou a padronização das frequências (PESSOA, 2011).

Originalmente, muitas instalações hidrelétricas operavam em 25 Hz devido à eficiência das turbinas hidráulicas, mas a cintilação luminosa em lâmpadas incandescentes era um efeito colateral indesejado. Com o tempo, os Estados Unidos padronizaram a frequência em 60 Hz, enquanto a Europa adotou 50 Hz, conciliando as características elétricas com o desempenho das turbinas a vapor (pois essa frequência possuía características elétricas aceitáveis, já que as turbinas a vapor

operavam satisfatoriamente nas correspondentes velocidades mecânicas de 1.800 *rpm* e 3.600 *rpm*). O avanço tecnológico continuou a impulsionar o setor elétrico, com equipamentos de maior capacidade e eficiência, além de lâmpadas mais eficazes e a popularização dos motores elétricos em diversas aplicações, devido à redução dos custos da energia elétrica (PESSOA, 2011).

Geradores síncronos acoplados a turbinas hidráulicas geralmente rodam com velocidade baixa, pois apesar da água possuir um torque maior que o vapor, a velocidade é reduzida.

A potência ativa é definida pelo trabalho realizado e o tempo com que se executa este trabalho, sendo que o trabalho é a energia consumida ao longo de um percurso. A variação de energia é, portanto, a energia que mudou de natureza ou transitou para outro lugar.

A potência ativa também pode ser entendida como o resultado do torque multiplicado pela velocidade. Essa relação entre torque e velocidade está diretamente relacionada às diferenças construtivas destas máquinas hidráulicas e a vapor.

Quem fornece a potência do tipo ativa é a turbina, máquina primária acoplada no mesmo eixo do gerador síncrono.

Quem fornece a corrente contínua I_f é o sistema de excitação e regulação de tensão. Esta corrente está relacionada com a potência reativa. A troca de reativo do sistema é função deste sistema. Para aumentar a potência do tipo ativa, portanto, comandos são enviados para a turbina aumentar a velocidade, não sendo possível, ela gera torque.

Não é possível que a turbina aumente a velocidade, ou seja, a rotação, simplesmente porque geralmente o gerador está conectado a uma barra muito mais forte que o gerador. No caso desta barra estar conectada com o sistema interligado nacional, ou seja, com a barra infinita, essa barra além de ser muito mais forte que o gerador, precisa estar síncrona com a frequência da máquina. A única forma, portanto, de aumentar a potência do tipo ativa é fornecendo torque, no caso das turbinas hidráulicas, fornecendo mais água e das turbinas a vapor, mais vapor a partir da abertura de válvulas.

Seguindo a relação de (7) entre o número de polos do rotor de um gerador (p), frequência da rede elétrica dada em *Hz* (f) e rotações por minuto ou *RPM* (N) do eixo da máquina, como o hidrogerador roda a uma velocidade menor, irá possuir mais polos, o que significa uma máquina maior que ocupa também mais espaço.

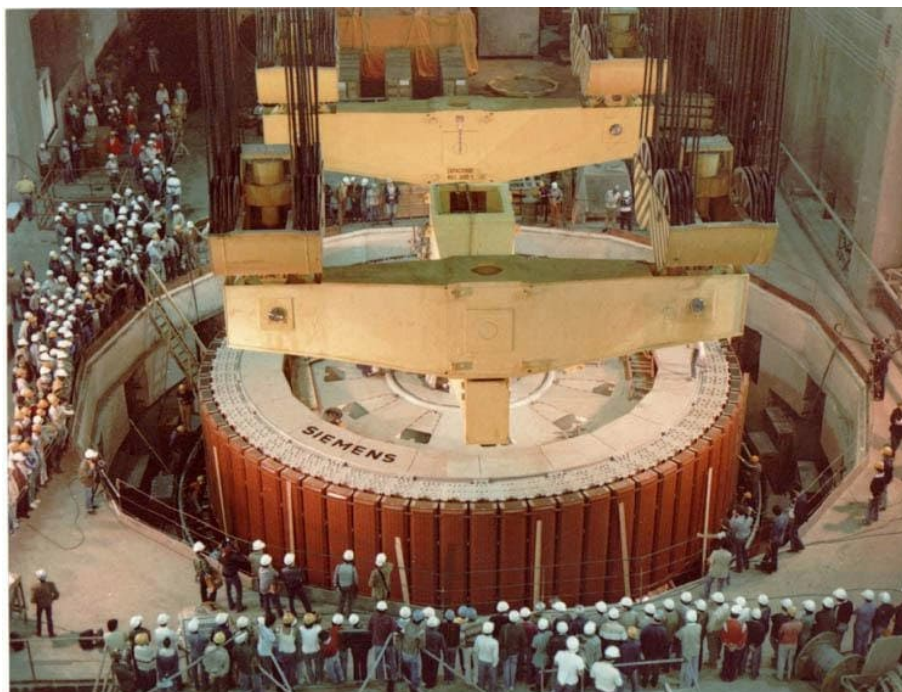
$$N = \frac{120 \times p}{f} . \quad (7)$$

Para se obter um sinal de tensão nos terminais do gerador de 60 Hz, o número de polos deve ser grande, caso a rotação seja baixa. Uma máquina com alta rotação, no entanto, precisa de menos polos para obter a mesma frequência.

Os polos dos geradores e seus enrolamentos fazem parte do projeto construtivo dessas máquinas, sendo um dos responsáveis pela frequência do sinal a ser gerado e formato da tensão induzida nos enrolamentos do estator, além de outros importantes fatores a serem considerados, como as características construtivas dos enrolamentos do estator.

Na Figura 16 mostra-se o rotor de um gerador da Usina Hidrelétrica de Itaipu, uma das maiores usinas hidrelétricas do mundo. Apesar de seu tamanho devido ao número de polos, esse gerador roda com uma velocidade de 90 rpm, justamente pelo motivo citado anteriormente.

Figura 14 - Rotor do gerador de Itaipu com 1760 toneladas a 90 rpm.



Fonte: (Facebook da Itaipu Binacional, 2019).

Na Figura 17 é possível ver uma orquestra sinfônica dentro do estator de um gerador da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Esse evento marcou a estreia da maior usina hidrelétrica do mundo até aquele determinado momento. Hoje, esta usina ainda ocupa a posição de segunda maior usina hidrelétrica do mundo, ficando atrás somente da Usina de Três Gargantas, na China, que existe desde 2008. A Siemens Brasil foi responsável pela construção de boa parte dos geradores existentes atualmente, sendo estas máquinas responsáveis por praticamente metade da atual

capacidade hidrelétrica instalada no Brasil, como citado pelo folheto da Figura 17. Na Figura 18 mostra-se o eixo que acopla uma turbina hidráulica de Itaipu ao seu respectivo gerador síncrono.

Figura 15 - Orquestra sinfônica dentro de um estator de um gerador síncrono na Usina Hidrelétrica de Itaipu.



Fonte: (DESIGNINNOVA, 2011)

Figura 16 - Eixo que acopla a turbina ao gerador.



Fonte: (FRAULINI, 2019).

Essas imagens têm como objetivo evidenciar ao leitor as diferenças construtivas entre um gerador acoplado a uma turbina hidráulica e a uma turbina a vapor, utilizadas na geração de energia a partir do vapor.

Multiplicadores ou redutores de velocidade podem ser utilizados no projeto da turbina e do gerador síncrono. No caso das turbinas hidráulicas, pode ser necessário um multiplicador de velocidade para que se reduza os polos do gerador, dessa forma utiliza-se menos material ferromagnético, economizando na construção.

Máquinas a vapor geralmente rodam com alta velocidade, pois o vapor apesar de possuir um torque menor, tem uma alta velocidade. Essa característica resulta em uma máquina menor, com menos polos, portanto, menos material ferromagnético, o que barateia o custo de produção. Além disso, essas turbinas ocupam espaços menores. Neste caso, é possível a utilização de redutores de velocidade entre a turbina e o gerador, pois a turbina pode chegar a rotações altíssimas, e mesmo que os geradores acoplados a estas turbinas possuam um número de polos reduzido, normalmente são geradores de 2 polos, ainda assim se faz necessário reduzir a velocidade da máquina primária, tamanha a grandeza que esta pode alcançar no caso das máquinas a vapor.

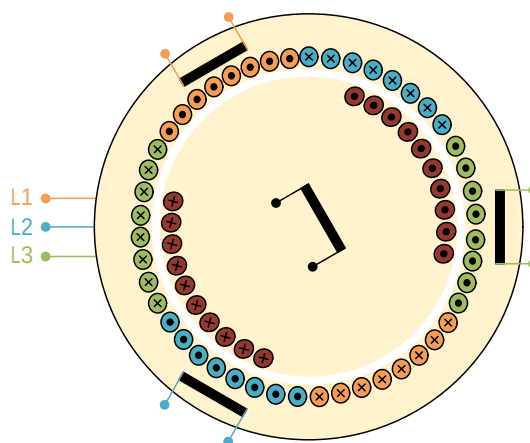
Do ponto de vista de regulação de velocidade, é muito simples realizar o controle dos geradores síncronos. O campo está diretamente relacionado a frequência da rede, então para diminuir a rotação do gerador, basta ajustar a frequência, desta forma o campo irá se movimentar com outra frequência e conseqüentemente a ponta do eixo da máquina também. A turbina é responsável pelo torque, porém, a frequência do gerador está diretamente relacionada ao campo que está, por sua vez, diretamente ligado ao número de polos.

Com o avanço da eletrônica de potência e com a nossa capacidade de usar frequências variáveis, é relativamente fácil fazer o ajuste de velocidade. Esta máquina é vastamente utilizada no sistema de geração de energia elétrica, justamente pelo fato dela ser síncrona, como citado anteriormente. Se o intuito é disponibilizar 60 Hz para os consumidores da barra, basta conservar a velocidade da máquina. Isso do ponto de vista de geração, é excelente.

Já máquinas assíncronas, motores de indução ou geradores de indução são, por exemplo, muito utilizados em geração de energia eólica. Do ponto de vista de construção, essas máquinas são mais simples que a máquina síncrona, porém, seu controle é mais complexo.

O diagrama esquemático de um gerador síncrono trifásico de polos lisos é apresentado na Figura 19.

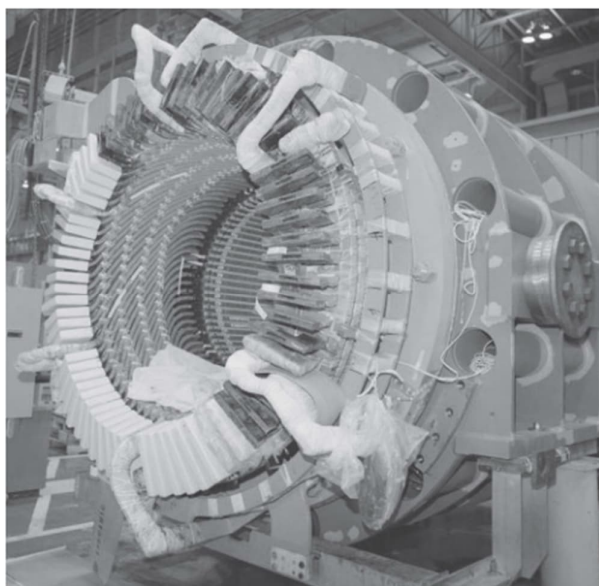
Figura 17 - Diagrama esquemático de um gerador trifásico de polos lisos.



Fonte: Elaboração própria.

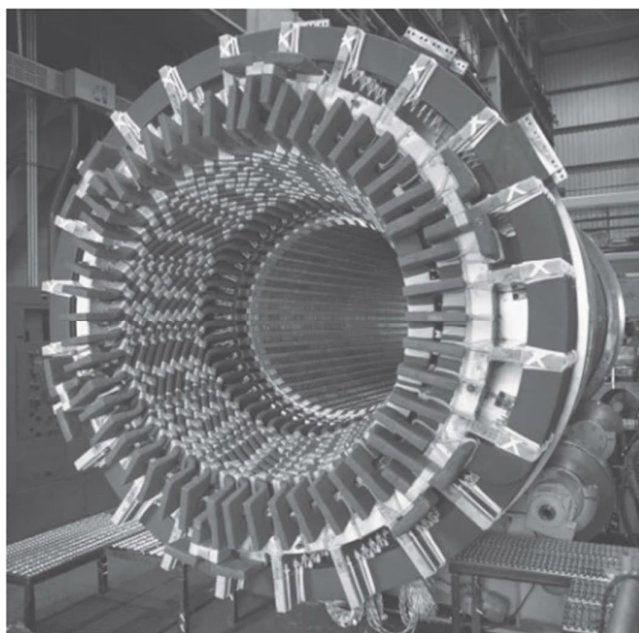
No meio é mostrado o rotor, que é conectado ao eixo e acionado por uma turbina, por exemplo, uma turbina a vapor, no caso das indústrias sucroalcooleiras. Três enrolamentos são instalados ao redor do rotor, o chamado estator, conforme a Figura 20. Esses enrolamentos são mostrados nas cores verde, laranja e azul. O rotor pode representar um ímã permanente e este ímã produz um campo magnético constante. Quando a turbina gira o rotor do gerador, o campo magnético também gira, induzindo tensões nos três enrolamentos estacionários. As tensões resultantes nos enrolamentos do estator podem ser vistas como três tensões senoidais. Estas tensões são as três fases do sistema CA

Figura 18 - Armadura de um gerador síncrono trifásico refrigerado a ar de 100 MVA em construção.



Fonte: (UMANS, 2014).

Figura 19 - Vista da extremidade do estator de um gerador a turbina de 16,5 kV, 275 MVA e 3600 rpm.



Fonte: (UMANS, 2014).

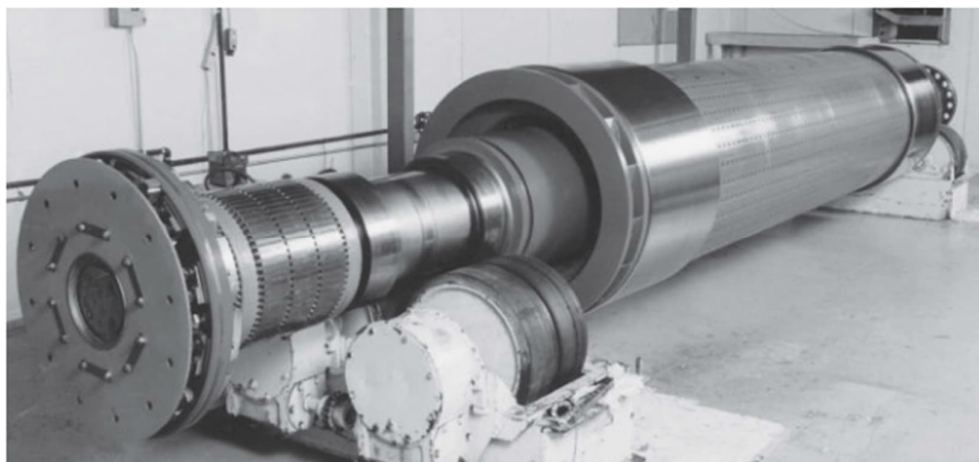
As Figuras 20 e 21 mostram os estatores de dois geradores trifásicos distintos, sem as bobinas giratórias no meio (enrolamentos do rotor). Já as Figuras 22 e 23 são fotos dos rotores de dois geradores trifásicos distintos, que se encontram dentro do estator, caracterizando-se como o eixo da máquina, onde o campo está e gira solidário a ele.

Figura 20 - Instalação do enrolamento de campo no rotor de um gerador síncrono de 2 polos.



Fonte: (UMANS, 2014).

Figura 21 - Rotor de um gerador a turbina de 100 MW. Um sistema de excitação sem escovas, usado para fornecer a corrente de campo, pode ser visto na extremidade mais próxima do rotor.



Fonte: (UMANS, 2014).

O enrolamento de armadura do estator possui diversos condutores, chamados de espiras, protegidos por um material isolante. Ao se analisar os condutores e as ranhuras, é possível visualizar o lado ativo e não ativo, sendo o lado ativo o responsável pelo fornecimento da tensão, do ponto de vista de geração de energia.

A construção destes condutores e ranhuras definem as características da tensão induzida nos terminais da máquina. Quando a distância entre uma bobina até a outra é exatamente igual a uma sapata ou peça polar do rotor, define-se este enrolamento como de passo pleno. Se essa distância é menor que a peça polar do rotor, o enrolamento é definido como passo encurtado.

A onda da força magnetomotriz é na verdade chanfrada, ou seja, uma onda quadrada. Ela possui uma componente senoidal, apesar de sempre ser tratada como uma senoide. Enrolamentos de passo encurtado são úteis por diversos motivos, por exemplo, eliminar o problema das harmônicas, que causam sérios prejuízos ao sistema elétrico.

Uma harmônica é um componente de uma onda ou sinal que é um múltiplo inteiro de uma frequência fundamental. Quando um sinal periódico, como uma onda sonora ou elétrica, pode ser decomposto em uma série de componentes sinusoidais, a frequência mais baixa é conhecida como a frequência fundamental ou primeira harmônica. As frequências subsequentes, que são múltiplos inteiros dessa frequência fundamental, são conhecidas como segundas, terceiras harmônicas, e assim por diante.

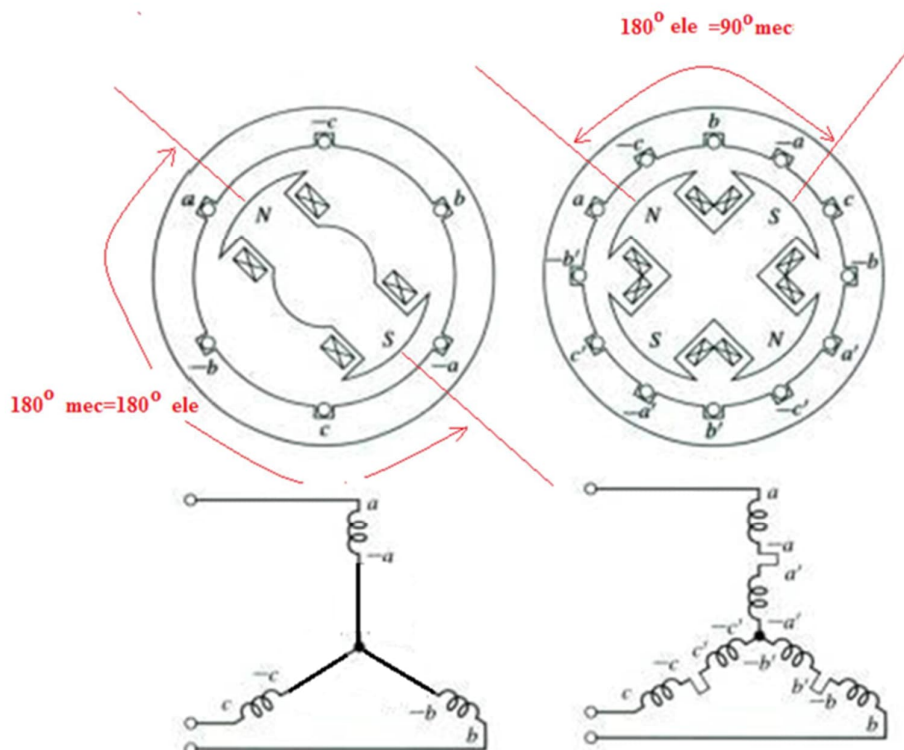
No contexto da música, as harmônicas são os sobretons que acompanham um tom fundamental e contribuem para a cor ou timbre de um som. Já na eletricidade, as harmônicas na corrente ou tensão podem levar a distorções no sistema de energia e afetar o funcionamento

eficiente dos equipamentos. Em muitos campos da ciência e engenharia, a compreensão e controle das harmônicas são importantes para garantir a integridade e qualidade dos sinais ou ondas sendo utilizados ou analisados.

Além dessas duas definições, o enrolamento de armadura também pode ser definido como concentrado e distribuído.

Na máquina de dois polos representada na Figura 24, os enrolamentos da fase *a* estão todos dentro da ranhura da fase *a*, ou seja, a corrente sempre entra por um lado e sai pelo outro. A corrente, na imagem, sai pelo lado $-a$ e entra em *a*. Todas as espiras e todos os enrolamentos são enrolados e concentrados em uma única ranhura. Ou seja, a corrente entra nesta única ranhura e sai em uma outra única ranhura. Chama-se esta configuração de enrolamento concentrado.

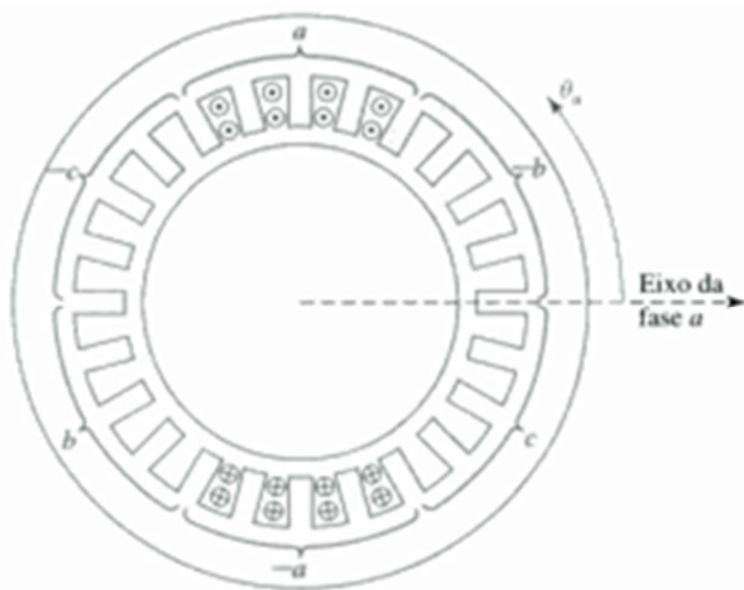
Figura 22 - À esquerda uma máquina síncrona trifásica de 2 polos salientes e à direita uma máquina síncrona trifásica de 4 polos salientes.



Fonte: (UMANS, 2014).

Visualiza-se exemplos de enrolamentos distribuídos na Figura 25. Distribuir é, utilizando o exemplo da máquina de dois polos da Figura 25, colocar em mais de uma ranhura o enrolamento que antes estava concentrado em apenas uma.

Figura 23 - Enrolamento de armadura distribuídos de uma máquina síncrona trifásica de dois polos.



Fonte: (UMANS, 2014).

Dessa forma, aproveita-se melhor o ferro da máquina, pois os intervalos entre um enrolamento e outro são utilizados para preencher adicionando ranhuras, ou seja, ocupa-se com mais eficiência o espaço da máquina. Essa característica dos enrolamentos distribuídos tem um impacto elétrico direto. Ao distribuir os enrolamentos, haverá uma redução na tensão da máquina.

Os enrolamentos de campo do rotor também podem ser do tipo distribuídos, assim como os enrolamentos de armadura.

Aplicando a Equação 8 na máquina de dois polos da Figura 25, onde o ângulo mecânico entre a e $-a$ é de 180° mecânicos e, a distância entre uma sapata polar e a outra, ou seja, o ângulo elétrico, é de 180° elétricos que correspondem à 180° mecânicos, caso específico para a máquina de dois polos. Assim é possível visualizar a importância construtiva dos graus elétricos e mecânicos e como eles definem muitos conceitos dentro da máquina síncrona.

$$\theta_{ele} = \left(\frac{P}{2}\right) \theta_{mec} . \quad (8)$$

As máquinas de corrente contínua se caracterizam por ter um componente chamado "circuito de campo" localizado na parte estacionária da máquina, conhecida como estator. O "circuito de armadura", por outro lado, encontra-se na parte girante da máquina, o que é chamado de rotor. Dependendo de como são conectados os terminais da máquina, o circuito de armadura pode funcionar como um gerador (produzindo energia elétrica a partir de um torque) ou como um motor (consumindo energia elétrica para gerar movimento).

A "corrente de excitação" I_f flui pelo circuito de campo e desempenha um papel fundamental ao criar o campo magnético principal na máquina. Este campo magnético é crucial para o funcionamento da máquina. A corrente no circuito de armadura, por sua vez, é induzida pela corrente de excitação I_f que circula no circuito de campo.

Essa explicação sobre máquinas de corrente contínua e suas características construtivas têm como objetivo ajudar o leitor a compreender as diferenças entre máquinas de corrente contínua e corrente alternada. Embora suas construções tenham diferenças, é importante notar que ainda existem semelhanças e conceitos compartilhados entre essas máquinas, assim como outras máquinas elétricas, como discutido anteriormente.

As máquinas síncronas desempenham um papel essencial na geração de energia devido à sua natureza síncrona. Na maioria dos casos, as máquinas de corrente alternada são configuradas como sistemas trifásicos, como antes mencionado.

Uma configuração típica envolve uma máquina de corrente alternada trifásica conectada a uma barra de alimentação, com um disjuntor entre elas.

Uma característica distintiva das máquinas síncronas é o campo girante. Nesse contexto, o circuito de excitação do campo está localizado na extremidade do eixo da máquina, girando em conjunto. Esse circuito atua como um campo magnético, enrolado em um polo, que gira dentro da máquina. Enquanto nas máquinas de corrente contínua, os polos magnéticos eram estacionários, nas máquinas síncronas, o campo magnético gira. Para manter esse campo, é necessário fornecer uma corrente contínua de excitação, denominada I_f .

Os enrolamentos do estator permanecem imóveis, mas o campo girante gera um fluxo magnético que atravessa esses enrolamentos. Esse fluxo variável, alternando entre norte e sul, induz correntes na armadura (no caso das máquinas síncronas a armadura localiza-se no estator).

No caso do gerador síncrono, é necessário que este esteja acoplado a uma unidade primária para acionar o campo girante, como uma turbina, por exemplo, fornecendo velocidade constante para o rotor. A rotação do rotor deve ser mantida a uma velocidade constante para garantir que o campo girante permaneça em sincronia com a frequência da rede elétrica. Isso assegura a produção de energia elétrica na frequência apropriada e mantém o gerador síncrono operando de forma estável e consistente.

O termo "campo girante" em máquinas de corrente alternada é literal, uma vez que o campo magnético é solidário a ponta do eixo da máquina. Isso pode ocorrer ao excitar a máquina com uma fonte que já está girando, no caso de um gerador, ou, simplesmente, alimentando-se o enrolamento da armadura com correntes ou tensões trifásicas defasadas de 120° , induzindo assim

um campo (gerado pelo estator) que está em sincronismo com o campo do rotor, caso a máquina seja um motor. É esse sincronismo que dá o nome de "máquina síncrona" a esse tipo de máquina.

Essas máquinas síncronas geralmente possuem um circuito de controle, conhecido como *AVR* (Regulador Automático de Tensão) ou *FCR* (Regulador de Corrente de Campo). O *AVR* controla a tensão ajustando a corrente de excitação (I_f) com base na medição do ponto de tensão nos terminais do gerador. O *FCR*, por sua vez, monitora diretamente a corrente de excitação I_f . Embora seja comum focar no *AVR*, o *FCR* desempenha um papel essencial no sistema de excitação, mostrado na Figura 26.

Figura 24 - Painel compondo o sistema de excitação e regulação de tensão.



Fonte: (Foto cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

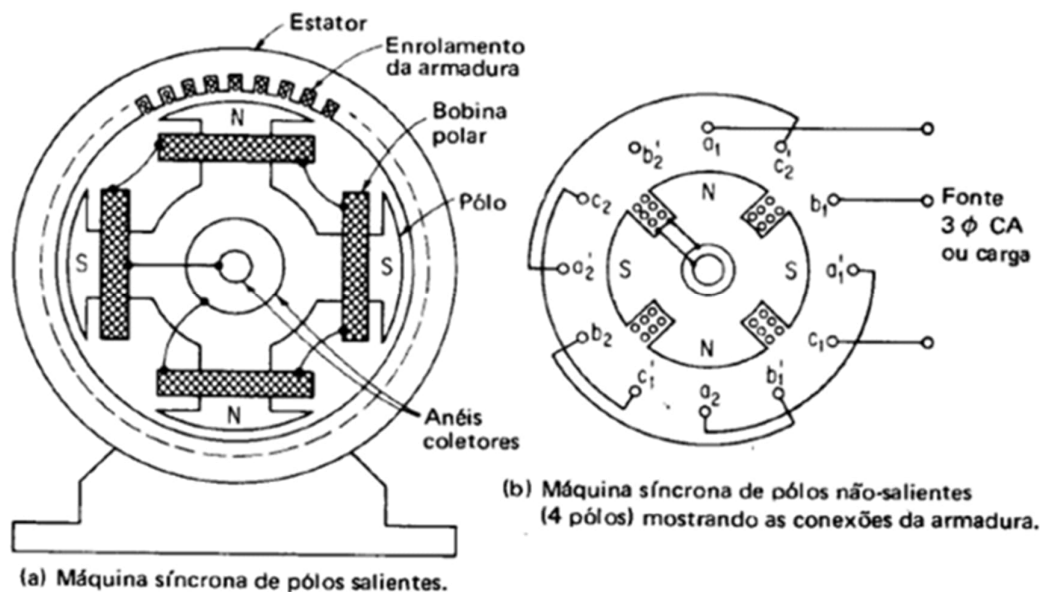
O sistema de excitação, como pode ser visto na Figura 26, é um sistema alojado em um conjunto de painéis elétricos de baixa tensão e é responsável pelo fornecimento da corrente de excitação contínua I_f nos enrolamentos de campo do rotor.

Outro aspecto importante a ser observado nas máquinas síncronas é o fato de que, devido à alternância dos polos magnéticos, a tensão produzida na armadura é de corrente alternada (CA), como mencionado anteriormente.

Como pode ser visto na Figura 27, o enrolamento do estator ou armadura da máquina encontra-se dentro das ranhuras na parte estacionária. O enrolamento de campo localizado na parte interna, possui 4 polos, sendo estes polos alternados entre norte e sul. Esta orientação de polo norte e sul, que faz do circuito semelhante a um ímã permanente, é definida simplesmente pelo jeito que

as espiras são enroladas nos polos, ou seja, enquanto um polo é enrolado no sentido horário, o polo seguinte é enrolado no sentido anti-horário. O fluxo sai do norte, cruza o entreferro (distância entre o polo e o estator), caminha pelo estator e volta para o polo sul.

Figura 25 - Representação de uma máquina síncrona trifásica de 4 polos salientes.



Fonte: (UMANS, 2014).

A máquina síncrona representada na Figura 27 possui polos salientes. Essa saliência se caracteriza por um entreferro não constante, pois entre um polo e outro (região interpolar) tem-se um entreferro que varia, o que resulta em um fluxo magnético não uniforme. Esta concentração varia principalmente ao longo do eixo axial, conhecido como eixo direto, onde o fluxo é mais intenso, em comparação com as regiões interpolares, referidas como eixo em quadratura (LOPES, 2017).

A decomposição da força magnetomotriz ocorre nesses dois eixos, gerando a força magnetomotriz do eixo direto e a força magnetomotriz do eixo em quadratura. Essas forças dão origem às respectivas correntes no eixo direto e no eixo em quadratura, que por sua vez induzem fluxos magnéticos específicos: o fluxo no eixo direto e o fluxo em quadratura (LOPES, 2017).

Os fluxos gerados nos eixos possuem permeabilidade magnética constante, e ao se somarem aos fluxos de dispersão, resultam nas reatâncias síncronas de cada eixo, conhecidas como X_d para o eixo direto e X_q para o eixo em quadratura. Estas reatâncias são parâmetros cruciais para o funcionamento e análise de desempenho da máquina, uma vez que influenciam diretamente a sua capacidade de geração e resposta a cargas elétricas (LOPES, 2017).

Por outro lado, nas máquinas com polos cilíndricos ou polos lisos, a uniformidade do entreferro favorece uma distribuição equilibrada do fluxo magnético ao longo da estrutura. Neste caso, apenas uma reatância é resultada do fluxo, chamada de X_s ou somente reatância síncrona (LOPES, 2017).

É importante lembrar que a corrente que circula no enrolamento de campo do rotor é uma única corrente, sendo ela a corrente contínua (corrente de excitação I_f) injetada no campo por meio de dois cabos, um para o negativo e outro para o positivo da corrente. Essa corrente entra no polo norte e depois no próximo polo para gerar o sul, circulando de enrolamento para enrolamento, até terminar em algum lugar. No caso da Figura 29, esta corrente começa e termina nos anéis coletores. Este rotor possui um anel que inicia e um que termina o caminho da corrente de campo I_f . É necessária a utilização de escovas para contato das correntes com esses anéis. Os anéis coletores são dielectricamente separados um do outro, ou seja, são isolados.

Na máquina CC, como o campo está na parte estacionária, é relativamente fácil alimentá-lo por uma fonte positiva e negativa, uma no começo e outra no fim do enrolamento. Já na máquina síncrona, onde a excitação é girante, é possível alimentar esse campo através destes anéis coletores e escovas, ou seja, há uma inversão da armadura pelo campo, sendo esta a principal diferença construtiva da máquina CA e CC.

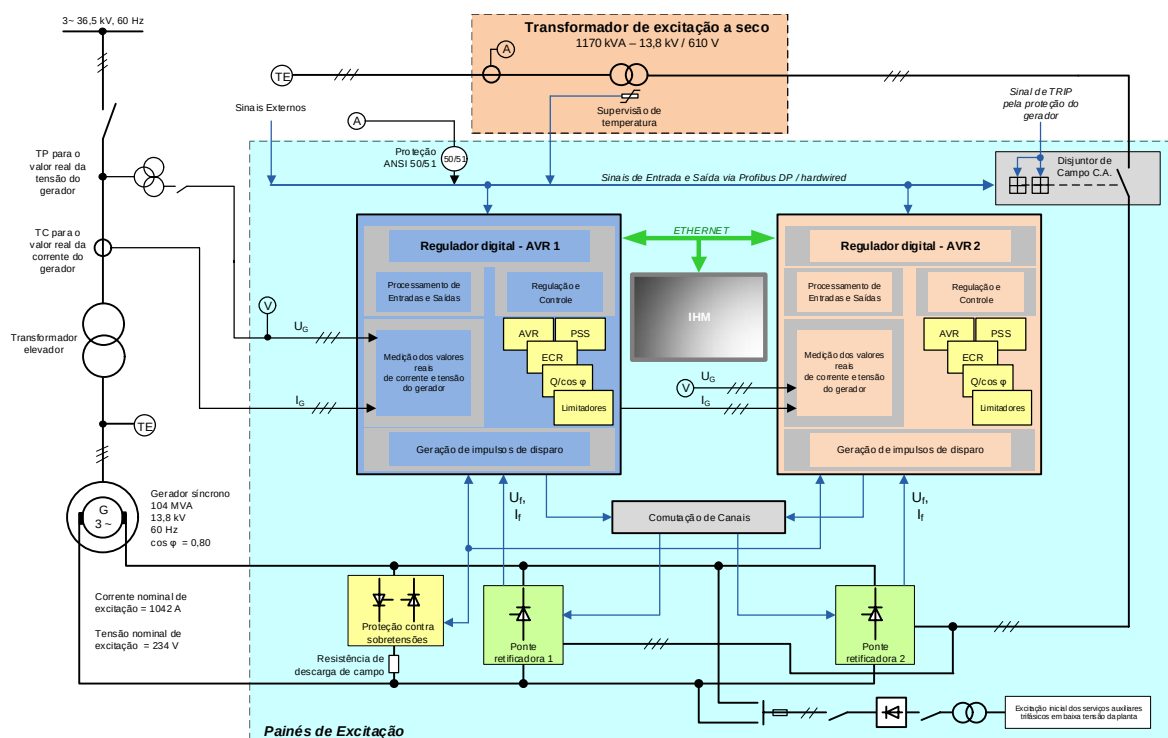
Após o fechamento do disjuntor, há a circulação de corrente CA. Com o disjuntor aberto não se tem corrente, claramente, porém ainda há tensão.

A corrente contínua I_f de campo vai gerar um polo norte e sul que estará rodando e as vezes ele excita a armadura com o polo norte e quando rodar 180° (no caso deste exemplo do gerador de 4 polos da Figura 28) irá excitar com o polo sul. A armadura é CA, mas a corrente que está rodando é CC. Isso é muito importante, pois erroneamente muitas pessoas entendem a máquina CA como excitação CA, porém em máquinas síncronas a excitação é sempre CC.

Embora a máquina seja trifásica, é comum apresentar seu diagrama unifilar (Figura 28), incluindo a barra, o disjuntor, a máquina e o fechamento de neutro, que pode ou não ser aterrado. O enrolamento trifásico encontra-se no estator, possuindo 6 terminais. Cada fase tem um terminal de entrada e um de saída. Geralmente, no lugar onde a máquina será aterrada há uma resistência de aterramento e depois o terra, dessa forma, caso haja correntes escapando para o terra, a resistência tem como função dissipar essa corrente.

Geralmente, quando existem máquinas em paralelo, aterra-se apenas uma máquina para que não haja circulação em terceira harmônica. As outras três fases abertas normalmente conectam-se a barra.

Figura 26 – Exemplo de um diagrama unifilar de um gerador e um sistema de excitação estática.



Fonte: (Diagrama cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

Os terminais “de cima” do gerador representado na Figura 28 são os terminais do lado de carga, e os terminais “de baixo” se chamam terminais do lado de neutro. O disjuntor geralmente está entre o gerador e conectado ao barramento trifásico.

O disjuntor do gerador desempenha um papel fundamental neste sistema e possui atuação em situações de sobrecorrente, interrompendo o circuito quando a corrente excede um valor predeterminado, prevenindo danos em equipamentos elétricos e evitando possíveis incêndios ou curtos-circuitos. Essa proteção é crítica em sistemas elétricos para garantir a segurança e a integridade dos componentes e dos próprios circuitos, pois ele tem capacidade de interrupção rápida sem ser danificado.

Quando é uma operação motora, ao fechar o disjuntor, uma corrente será fornecida ao estator. No gerador, o estator fornece a corrente para a carga.

Alguns geradores síncronos são conectados a sistemas de distribuição de energia, sendo crucial que estejam sincronizados com a frequência e tensão da rede antes de entrarem em operação. Através de transformadores de medição, chamados de transformadores de potência e transformadores de corrente (TP e TC), é possível enviar sinais para equipamentos de dentro do painel contendo o sistema de excitação e regulação da tensão.

Esses transformadores são responsáveis por ler a tensão e corrente em pontos específicos, como por exemplo, transformadores de corrente instalados entre o neutro do gerador e o terra, para conferir se não há fuga de corrente, já que a corrente neste ponto deve ser zero (a soma das três correntes no nó tem que ser zero; na presença de qualquer desequilíbrio, algum curto-circuito, por exemplo, a corrente sempre foge para o terra).

Transformadores de potencial localizados entre os terminais do gerador e a barra infinita leem a tensão nesses pontos e o sistema de excitação e regulação de tensão recebe em tempo real esses sinais, sendo possível realizar operações internas a partir de softwares de engenharia de controle de forma a ler a tensão da barra e a tensão nos terminais trifásicos do gerador, para que essas tensões estejam sempre síncronas em amplitude e frequência, exatamente uma forma de onda sobreposta a outra. O sistema é inteligente e automático, ou seja, o próprio regulador recebe os sinais e emite internamente comandos para ajuste da corrente de excitação de forma a controlar a tensão nos terminais da máquina.

Existem relés de sincronismo que servem para monitorar o disjuntor e a frequência do gerador e da barra, assim que as ondas senoidais de tensão estiverem casadas, o relé emite um comando de fechamento do disjuntor.

Os transformadores são essenciais dentro do sistema elétrico, já que adaptam as tensões reais para grandezas aceitáveis do ponto de vista dos equipamentos. Um exemplo comum é o transformador de potencial que possui o primário conectado a barra de 36,5 kV e abaixa essa tensão enviando sinais de medição na grandeza dos 200 V para leitores de grandezas reais que estão, por sua vez, conectados ao regulador de tensão, responsável por este controle, como ilustrado na Figura 29.

Além disso, a partir destas medições os relés de proteção do gerador conseguem agir, seja causando uma parada forçada ou segregando parte do sistema com defeito. Ao verificar uma irregularidade, o relé retira a bobina de mínima e elimina a tensão, enviando um comando de abrir o disjuntor, desta forma, retira-se a máquina da rede e assim gera-se um TRIP (alarme ou “*shutdown*”).

Um exemplo de falha comum em geradores síncronos é o rompimento de cabos de controle, muitas vezes roídos por ratos na indústria. O gerador pode se tornar disfuncional quando partes desses fios se rompem, impedindo, por exemplo, que medições sejam realizadas de forma precisa.

As proteções não só são importantes do ponto de vista da máquina síncrona individualmente falando, como também de toda a coordenação das máquinas da indústria, que em diversos casos estão conectadas em paralelo a barra da usina que é conectada com a barra infinita da

concessionária. Ou seja, o grau de proteção deve ser extremamente monitorado por organizações e normas regulamentadoras.

Essas proteções são essenciais para prevenir qualquer acidente, que pode não somente causar danos irreparáveis ao gerador, como no pior dos casos pode comprometer a segurança das pessoas. Acidentes relacionados à eletricidade podem ser fatais, por isso é necessário que o engenheiro sempre se responsabilize de projetar um sistema redundante, robusto e bem protegido.

Nos sistemas de energia elétrica, existem códigos usados internacionalmente que indicam quais recursos um dispositivo de proteção tolera. A tabela ANSI/IEEE (*American National Standards Institute E Institute of Electrical and Electronic Engineers*) possui diversas normas de padronização na área da elétrica e essas normas possuem sequência numérica, identificando os dispositivos de proteção através de um número. Alguns exemplos das proteções ANSI, como são chamadas, são o relé de proteção 27, de subtensão, protegendo os equipamentos de operarem abaixo da sua capacidade, causando danos de sincronização do sistema no caso do gerador síncrono, bem como faz com que o gerador possa começar a operar como um motor de indução ao invés de um gerador síncrono. O relé de proteção de sobrecorrente instantâneo 50, possui diversas variações, como sobrecorrente instantâneo de neutro, instantâneo de terra e contra arco elétrico. O relé de proteção 64 opera em falhas de isolamento de máquinas, seja no rotor ou no estator (64R e 64S), chamado de relé de proteção de terra. O relé de proteção número 74 é o relé de *trip* ou alarme, que pode ser visual ou sonoro. As proteções são de extrema importância e não serão aprofundadas neste trabalho, porém, devem ser conhecidas pelos engenheiros que trabalham com sistemas de energia.

Apesar de somente o motivo da segurança ser suficiente para justificar um cuidado valioso com a integridade do projeto, equipamento e serviços nas máquinas, outro motivo pelo qual as empresas confiam seus geradores e turbinas a grandes empresas de engenharia para realização de seus projetos e investem bastante nesse meio, é o retorno lucrativo diário que estas usinas recebem da produção de energia e o prejuízo gigantesco caso ocorra uma parada na planta. Essas empresas têm um papel essencial na manutenção do sistema elétrico brasileiro, realizando serviços em campo e mobilizando equipes inteiras para as paradas programadas das usinas e indústrias.

Um sistema de excitação tem um ciclo de vida de 10 anos geralmente, podendo operar por muitos anos a mais, porém, para acompanhar a tecnologia e inovações constantes que trazem benefícios para as indústrias e para a sustentabilidade da geração de energia, a manutenção e modernização destes sistemas é essencial, bem como a manutenção das turbinas, geradores, caldeiras etc.

Geradores síncronos, por sua vez, podem ficar décadas em operação. Os geradores de excitação estática, como será mencionado a seguir, possuem escovas de carbono estáticas em contato com os anéis coletores que estão girando no eixo do gerador. Um dos problemas é que as escovas geram faiscamento e não existe lubrificação, pois o lubrificante acaba sendo um isolante e esta escova precisa estar em contato direto com os anéis, para passagem da corrente. Entretanto, a escova geralmente é de carbono, sofrendo corrosão com o tempo de forma a deslizar muito facilmente, não tendo problema de lubrificação. Propositamente, essas escovas são compostas de um material que, quando no final de sua vida útil, gera faísca com mais intensidade, assim, é mais fácil identificar a necessidade de uma parada para manutenção da máquina e troca das escovas.

Discutiu-se sobre os sistemas de excitação, porém, este assunto será um pouco mais detalhado nos próximos tópicos, onde especifica-se os dois tipos de sistemas de excitação de máquinas síncronas, o sistema de excitação estática (com escovas) e o sistema de excitação sem escovas, conhecido como sistema de excitação “*brushless*”.

A operação eficiente e segura de um gerador síncrono é guiada por sua curva de capacidade, demarcando-se os limites superiores de carga de potência reativa para diferentes níveis de potência ativa, operando sob a tensão de terminal nominal. Neste cenário, o papel do sistema de excitação se torna fundamental. Ele é o responsável por ajustar e controlar de forma precisa a corrente de excitação, garantindo que a operação do gerador permaneça dentro dos limites estabelecidos pela curva de capacidade.

A área operacional viável de um gerador síncrono é comumente representada por uma curva de capacidade. Essa curva é crucial, pois delineia os limites máximos de carregamento de potência reativa para várias cargas de potência ativa, mantendo-se na tensão de terminal nominal.

Essas curvas de capacidade são ferramentas essenciais tanto para os engenheiros responsáveis pelo planejamento de sistemas de energia quanto para os operadores de sistemas. No contexto do planejamento, elas permitem aos engenheiros avaliar rapidamente se os geradores existentes ou aqueles em planejamento podem atender às demandas de carga de maneira segura e eficiente. Da mesma forma, para os operadores de sistema, estas curvas são um recurso indispensável para verificar se os geradores individuais podem se ajustar de maneira segura às flutuações de carga que ocorrem regularmente durante a operação normal do sistema. Este entendimento e respeito à curva de capacidade do gerador são fundamentais para garantir o funcionamento eficiente e seguro dos sistemas de potência.

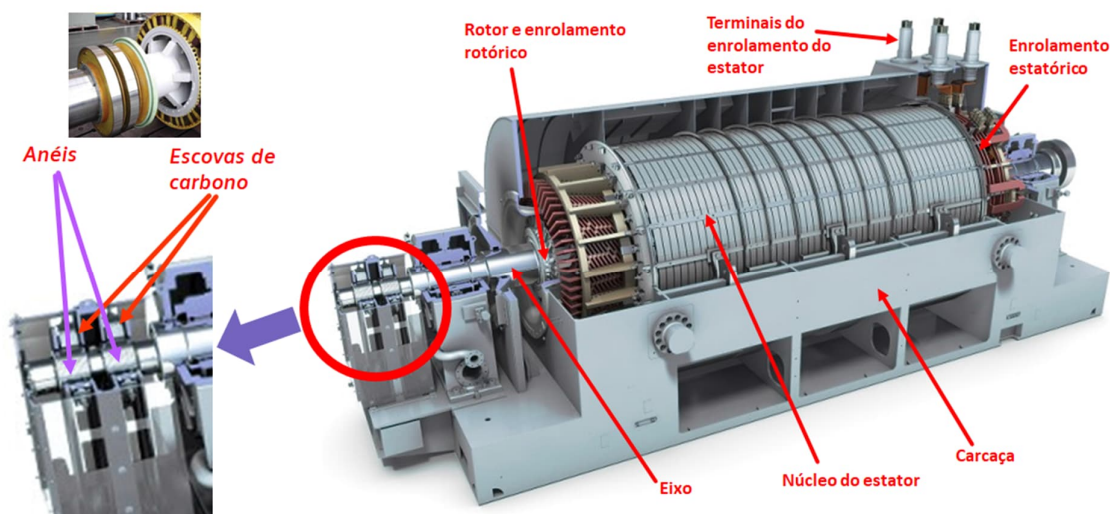
4.3.1 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO ESTÁTICOS

Os sistemas de excitação estática são empregados para excitação e regulação de tensão, potência reativa ou fator de potência de máquinas síncronas dotadas de escovas. Aplica-se igualmente a geradores síncronos acionados por turbina hidráulica, à vapor ou a gás, bem como compensadores síncronos em subestações.

O circuito de campo magnético, intrinsecamente ligado ao eixo da máquina, roda em sincronia com a velocidade operacional da máquina. Este circuito é composto por polos magnéticos norte e sul, que, ao girarem, excitam o enrolamento de armadura estacionário.

No caso das máquinas com excitação do tipo estática, a alimentação do campo giratório é realizada por meio de sua conexão a anéis coletores em rotação, aos quais o acesso se dá por escovas fixas em contato contínuo com os anéis, como indicado na Figura 29.

Figura 27- Gerador síncrono com escovas com seus anéis coletores e escovas de carbono, fabricante Siemens Energy Brasil.



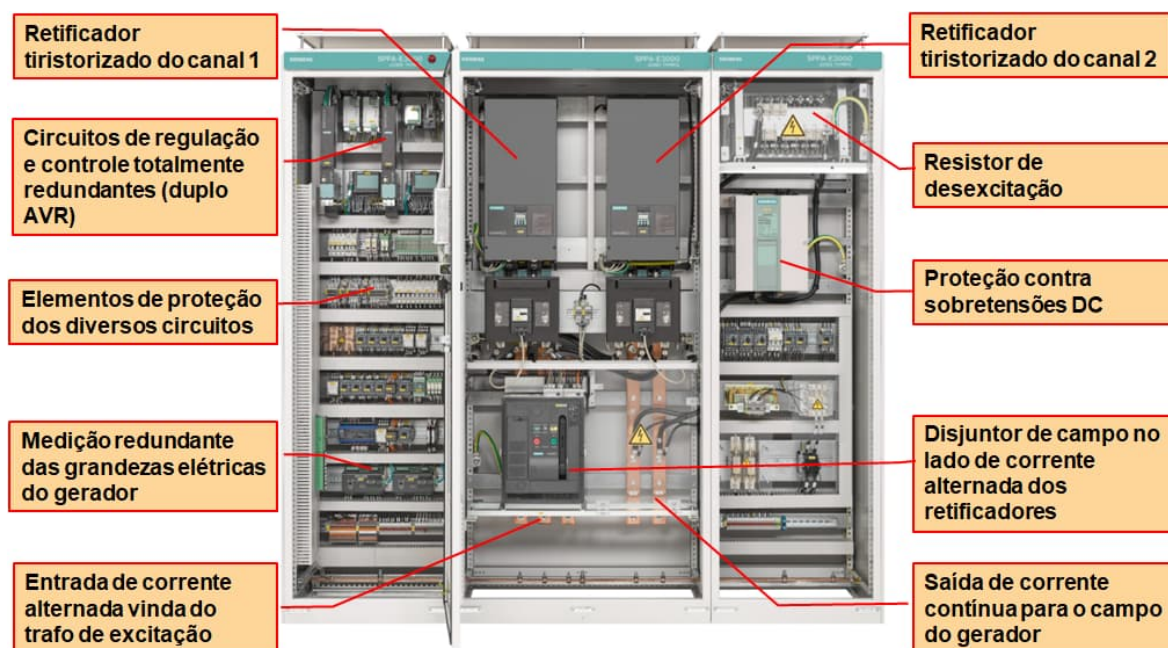
Fonte: (Foto cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

Cada anel coletor está conectado a um polo magnético, proporcionando um circuito fechado para a corrente de excitação. Durante a operação, as escovas permanecem imóveis enquanto se injeta a corrente por meio de um driver eletrônico externo. Esse driver, equipado com eletrônica de potência avançada, é responsável por ajustar a corrente de campo de acordo com a tensão medida nos terminais do gerador, assegurando a tensão terminal desejada.

O sistema de excitação estática, conforme ilustrado na Figura 30 baseia-se em conversores capazes de fornecer a corrente necessária às escovas. Esses conversores, no caso do sistema de

excitação estática, são do tipo tiristorizado, configurado como ponte retificadora trifásica totalmente controlada (B6C), alimentada pelo transformador de excitação. O conversor tiristorizado permite ajustar, praticamente sem retardo de tempo, qualquer valor de tensão entre o máximo valor positivo e o máximo valor negativo da tensão (tensão de teto positiva e negativa). Normalmente, esses conversores são projetados com redundância do tipo 1+1, ou seja, o painel contém duas pontes retificadoras conectadas em paralelo, cada uma dimensionada para 100% da capacidade máxima contínua definida para o sistema de excitação. Neste caso, apenas uma ponte retificadora estará fornecendo a corrente de campo; a outra permanecerá bloqueada e assumirá a condução da corrente quando da ocorrência de defeitos na ponte retificadora em operação. Esse procedimento se chama comutação de canais.

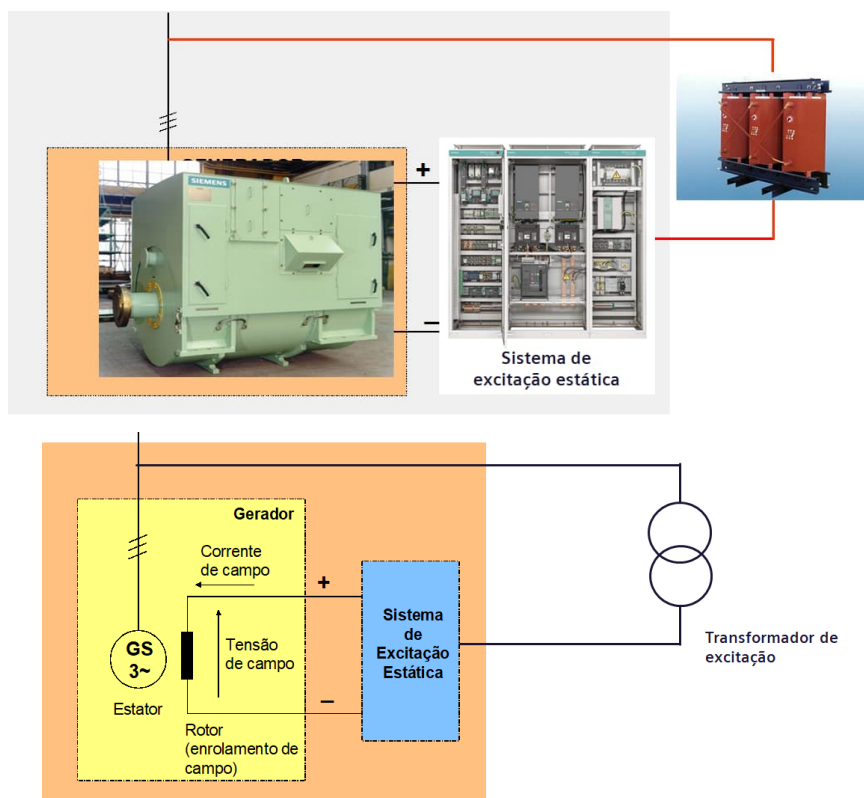
Figura 28 - Exemplo de um painel elétrico compondo o sistema de excitação estática e regulação de tensão, fabricante Siemens Energy Brasil.



Fonte: (Foto cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

Para seu funcionamento, o conversor demanda energia, frequentemente derivada dos terminais do gerador através de um transformador de excitação, que retroalimenta o sistema com a tensão gerada, como é possível visualizar na Figura 31. Contudo, para o início da excitação, se necessita de um sistema de excitação inicial, conhecido como *'field flashing'*.

Figura 29 – Exemplo de um diagrama unifilar de um sistema de excitação estática e regulação de tensão, fabricante Siemens Energy Brasil.



Fonte: (Diagrama cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

O *field flashing* ou excitação de partida é um circuito auxiliar para excitação inicial do gerador, necessário nos casos de sistemas de excitação alimentados pelo próprio gerador através de um transformador de excitação. A energia auxiliar para partida, neste caso, pode ser proveniente dos serviços auxiliares em baixa tensão da planta, em CA ou CC (baterias). Porém, também é possível alimentar o sistema de excitação a partir dos serviços auxiliares em média tensão da planta.

Entre as vantagens da excitação estática, destaca-se a rápida resposta do sistema, que depende exclusivamente do driver. A corrente de campo é aplicada diretamente ao circuito de campo do gerador, resultando em um controle mais ágil do reativo do sistema. No entanto, essa técnica não está isenta de desafios: o desgaste das escovas de carbono e o faiscamento são problemas recorrentes. Além disso, a alta corrente de campo exige cabos de grandes bitolas, o que aumenta significativamente os custos.

A implementação física do conversor, muitas vezes situado em uma sala separada da máquina, pode acarretar distâncias consideráveis, influenciando diretamente no tamanho e no custo dos cabos de conexão. Todavia, a rápida entrega de corrente compensa esses desafios.

Na Figura 31 é possível visualizar a saída da corrente contínua para o campo do gerador por meio de barramentos consideravelmente grandes.

O sistema de excitação estática geralmente incorpora um sistema de refrigeração mais robusto para dissipar o calor gerado pelos conversores, além de um sistema de proteção contra sobretensões mais potentes, bem como disjuntores de campo de tamanhos consideráveis.

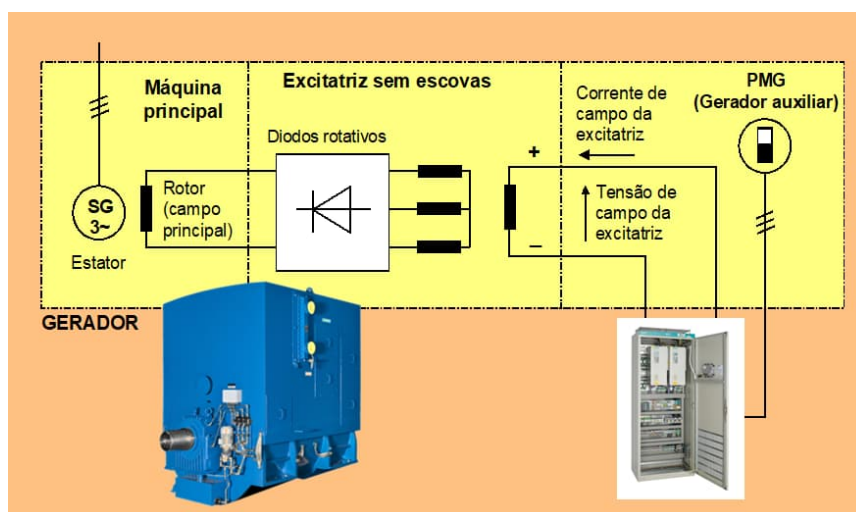
A tecnologia de excitação estática, portanto, apresenta-se como uma solução eficaz na regulação e manutenção da qualidade e estabilidade em sistemas de geração de energia elétrica.

4.3.2 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS

Detalha-se neste tópico a função dos sistemas de excitação sem escovas em geradores síncronos, sendo estes sistemas menos robustos comparados ao sistema de excitação estática, já que eliminam a necessidade da alimentação do sistema com correntes excessivamente altas.

Utiliza-se um gerador intermediário de corrente alternada (CA), equipado com uma ponte de diodos, como mostrado na Figura 32, que produz um sinal trifásico.

Figura 30 – Exemplo de um diagrama unifilar de um sistema de excitação *brushless* e regulação de tensão, fabricante Siemens Energy Brasil.

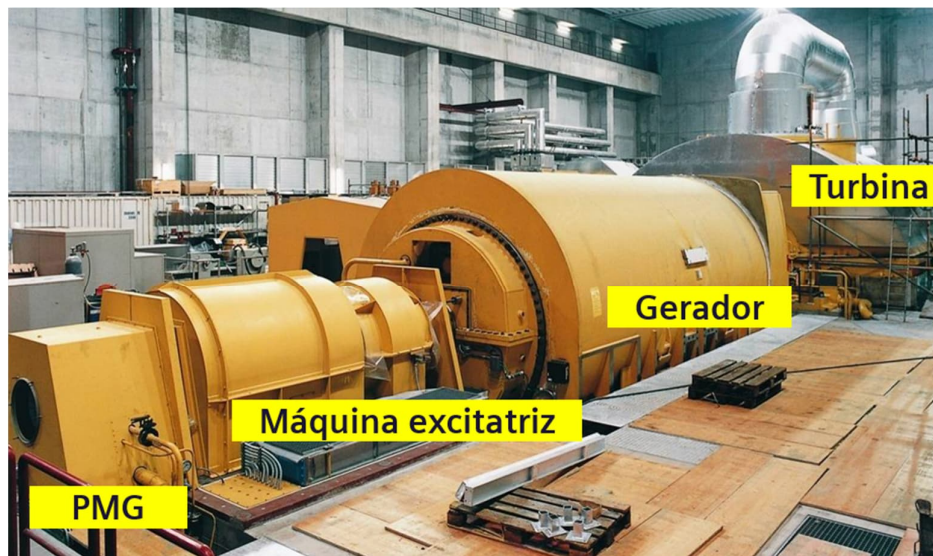


Fonte: (Diagrama cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

Este gerador emprega um sistema de excitação semelhante ao de máquinas de corrente contínua (CC), com a excitação posicionada na parte estacionária, fornecendo corrente de excitação I_f do tipo CC à máquina auxiliar. A ausência de escovas é viável devido à posição estacionária do campo no estator, enquanto a armadura no rotor gira, gerando uma corrente

alternada de alta potência que é retificada pela ponte de diodos. Na Figura 33 é possível ver que todas essas máquinas estão rodando no mesmo eixo, solidário ao eixo da máquina primária.

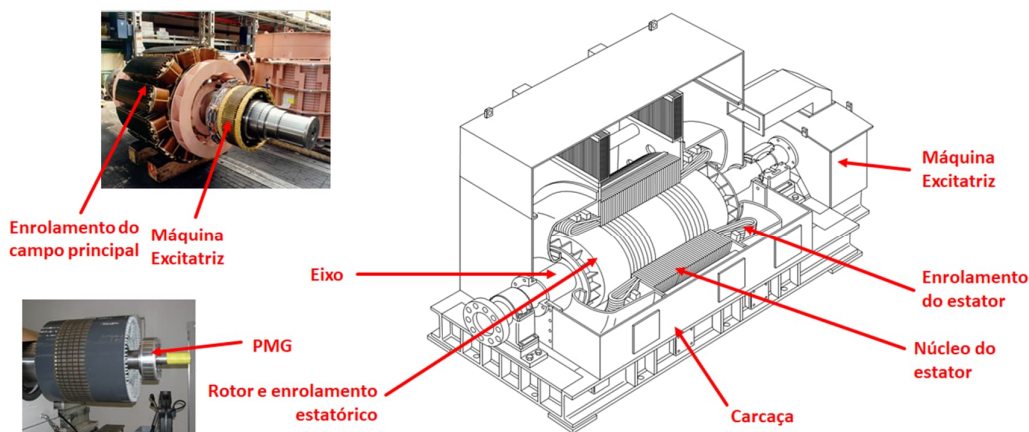
Figura 31 - Conjunto de todas as máquinas solidárias ao eixo da turbina.



Fonte: (Foto cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

A implementação deste sistema *brushless*, impulsionada pelo avanço da eletrônica de potência, gera uma tensão terminal de corrente alternada nos terminais da máquina auxiliar. Os diodos rotativos, grandes componentes físicos dentro da máquina, são responsáveis pela retificação dos sinais trifásicos, capturando a parte superior da forma de onda. Este *design* geralmente dispensa filtros, dada a estabilidade do sinal proporcionada pelo uso de mais de três fases. Detalhes deste sistema são vistos na Figura 34.

Figura 32 - Gerador síncrono *brushless* com sua respectiva excitatriz piloto e o PMG.



Fonte: (Foto cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

Entre as vantagens deste sistema, destaca-se a capacidade de alimentar a máquina auxiliar com uma corrente contínua menor através do sistema de excitação auxiliar, que gera um sinal CA e depois é retificado para um sinal CC, alimentando o campo principal. Isso elimina a necessidade de escovas e comutação do sinal CA. Pode-se visualizar as características construtivas deste campo da excitatriz por meio da Figura 35. Além disso, o sistema requer correntes menores do painel de excitação, reduzindo-se a necessidade de cabos de grande bitola e, portanto, sendo mais econômico.

O sistema de excitação auxiliar atua como um amplificador, aumentando o valor da corrente de um nível baixo para um alto. Isso é crucial, pois o gerador funciona como um grande indutor, então um indutor de grande bitola age essencialmente como um curto-circuito. A corrente, sendo do tipo CC, não está sujeita ao efeito de (9), tratando-se mais próximo a uma resistência. Dada ao tamanho da bitola do circuito, a resistência é baixa, o que justifica a tensão baixa no sistema de excitação, já que a corrente alta com baixa resistência não requer alta tensão.

$$\frac{L di}{dt} \quad (9)$$

No sistema de excitação empregado para injeção da corrente de excitação I_f no campo da máquina auxiliar, chamada de excitatriz, é necessária uma corrente substancialmente menor em comparação com os sistemas que utilizam excitação estática com conversores tiristorizados. Neste contexto, o sistema emprega conversores baseados em Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBTs).

A tensão que alimenta a parte de potência do conversor é internamente retificada, criando um circuito intermediário de tensão contínua, conhecido como link D.C. Este circuito é estabilizado por um capacitor. A tensão retificada e fixa fornecida pelo link D.C. é convertida em uma tensão D.C. variável por um conversor de potência D.C./D.C., composto por quatro transistores bipolares de potência (IGBTs). Esta tensão variável constitui a tensão de saída do conversor, a tensão de excitação, que será aplicada no enrolamento de campo da excitatriz. A modulação desta tensão de saída é realizada por meio da Modulação por Largura de Pulsos (PWM), que controla os transistores (IGBTs) do chopper. O sinal de controle para este chopper transistorizado é gerado pelo Regulador Automático de Tensão (AVR), que compara o valor de referência da tensão do gerador, ajustado pelo operador, com o valor efetivamente medido pelo medidor de grandezas reais através dos Transformadores de Potencial (TPs) do gerador.

Em casos de desexcitação ou descarga do campo, a energia acumulada no enrolamento de campo é redirecionada de volta para o link D.C., onde é dissipada por um resistor de descarga de

campo, integrado ao sistema. Este processo garante um controle eficaz e seguro do sistema de excitação, adaptando-se dinamicamente às necessidades operacionais do gerador.

Na Figura 35 é possível visualizar um painel contendo o sistema de excitação e regulação de tensão de um gerador síncrono sem escovas. A parte de potência deste sistema é consideravelmente menor que a do sistema de excitação estática.

Figura 33 – Exemplo de um painel elétrico compondo o sistema de excitação *brushless* e regulação de tensão, fabricante Siemens Energy Brasil.



Fonte: (Foto cortesia da empresa SIEMENS ENERGY BRASIL LTDA.).

No entanto, o sistema também apresenta desvantagens, como uma resposta mais lenta na injeção de reativo, já que neste caso, além da resposta do driver conversor, soma-se a resposta da máquina excitatriz intermediária ao sistema.

A ponte de diodos também pode falhar devido a curtos-circuitos ou circuitos abertos, afetando a qualidade da tensão terminal do gerador. As evoluções nos sistemas de monitoramento permitem a detecção de falhas nos diodos por meio da análise de harmônicas da onda senoidal.

Em suma, a adoção de sistemas de excitação sem escovas representa um avanço significativo na engenharia de geração de energia, oferecendo eficiência operacional e economia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A complexidade da engenharia atribuída aos geradores síncronos aliada à uma análise histórica, política, econômica, ecológica e tecnológica da cana-de-açúcar e a indústria sucroalcooleira oferecem um terreno fértil para exploração acadêmica.

Um dos desafios mais significativos foi tecer um caminho comum através dos diversos e ricos tópicos aqui abordados. Cada tema revelou detalhes fascinantes, instigando aprofundamento contínuo, um desejo que frequentemente se confrontava com as limitações inerentes a um trabalho de conclusão de curso.

A revisão histórica da cana-de-açúcar emergiu como um dos aspectos mais gratificantes deste estudo. A utilização de referências bibliográficas robustas enriqueceu significativamente esta análise, reforçando a importância do entendimento dos contextos históricos em que as tecnologias e métodos de produção se desenvolvem. Como sabiamente destacado por Carl Sagan: “A ciência é muito mais que um corpo de conhecimentos. É uma maneira de pensar” (SAGAN, 1990).

No mais, a análise da arquitetura e do funcionamento da cogeração de energia nas usinas sucroalcooleiras reafirmou algo já sabido: a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos, de automação e de controle inerentes a essas indústrias.

O intuito foi não só ressaltar o papel crucial dos geradores síncronos na cogeração, mas também detalhar suas características construtivas e o sistema de excitação, elementos centrais na geração de energia elétrica. É uma área de pesquisa e desenvolvimento que com um imenso interesse em aprofundar-se.

Espera-se que os *insights* e conclusões obtidos possam inspirar futuros profissionais da área a explorar as inovações e implementações que os geradores síncronos ainda podem oferecer, contribuindo para um setor energético mais sustentável e eficiente e, por extensão, para um futuro energético mais promissor para o Brasil.

REFERÊNCIAS

CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOLOGIA (CIB). **Guia da Cana-de-açúcar: Avanço científico beneficia o País.** Resoluções CIB, 2009. Disponível em: https://edisiplinas.usp.br/pluginfile.php/4307289/mod_resource/content/1/guia_cana.pdf

D'AGOSTINI, S. et al. **A Cana-de-açúcar Permeando pelo Centro de Memória do Instituto Biológico.** Revista do Instituto Biológico, 2009. Disponível em: http://www.biologico.agricultura.sp.gov.br/uploads/docs/pag/v5_1/dagostini.html

De volta à 1981. 2011. Disponível em: <https://designinnova.blogspot.com/2011/08/de-volta-1981.html>. Acesso em: 14 nov. 2023.

FIOMARI, Marcelo. **Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão.** Dissertação de mestrado apresentado à Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2004. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/nuplen/analise-energetica-e-exergetica-de-uma-usina-sucroalcooleira-do-oeste-paulista-com-sistema-de-cogeracao-de-energia-em-expansao.pdf>

FRAULINI, Rubens. **Eixo de uma unidade geradora da Itaipu.** Itaipu Binacional, 2019. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/itaipu-atinge-em-julho-maior-produtividade-mensal-da-historia>

ITAIPU BINACIONAL. Facebook da Itaipu Binacional, 2019. Disponível em: <https://m.facebook.com/ItaipuBinacionalOficial/photos/imagem-mostra-a-descida-do-rotor-a-pe%C3%A7a-mais-pesada-de-uma-unidade-geradora-com-/3066084043411015/>. Acesso em: 14 nov. 2023.

JORNALISTAFPA. **Cana-de-açúcar: Tecnologia e sustentabilidade beneficiam cidadãos e meio ambiente.** Agência FPA, 2022. Disponível em: <https://agencia.fpagropecuaria.org.br/2022/10/06/cana-de-acucar-tecnologia-e-sustentabilidade-beneficiam-cidadaos-e-meio-ambiente/>

KOSOW, Irving. 1919. **Máquinas elétricas e transformadores por Irving L. Kosow: tradução de Felipe Luis Daniello e Percy Antônio Soares.** Porto Alegre, Globo, 1982.

LIMA, R. B. C.; BARROSO, H. C.; BARROS, P. R. **Desenvolvimento de uma planta piloto térmica com rede WirelesHart para uso em ensino e pesquisa.** 2014. In: COBENGE: Engenharia Múltiplos Saberes e atuações. Juiz de Fora – MG.

LOPES, Romário. **Estudo de um gerador síncrono de pólos salientes isolados da rede elétrica alimentando cargas resistivas variáveis**. Monografia apresentada à Universidade Federal de Viçosa, 2017.

MOTTA, D. **Projeto da UFRJ cria museu virtual sobre as primeiras máquinas elétricas**. FAPERJ, 2011. Disponível em: <http://www.eng.uerj.br/noticias/1294087517-Projeto+da+UFRJ+Cria+Museu+Virtual+Sobre+As+Primeiras+Maquinas+Eletricas>

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **O que é ONS**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>

PESSOA, Isac. **Avaliação da matriz e eficiência energética de uma empresa siderúrgica**. Tese de doutorado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

PEXE, Ronaldo. **Turbina a vapor de condensação**. 2020. Publicação no site Turbivap. Disponível em: <https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-condensacao/>

PEXE, Ronaldo. **Turbina a vapor de contrapressão**. 2020. Publicação no site Turbivap. Disponível em: <https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-contrapressao/>

RODRIGUES, Gelze; JURANDYR, ROSS. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental**. Editora da Universidade Federal de Uberlândia (EDUFU), 2020. Disponível em: http://www.edufu.ufu.br/sites/edufu.ufu.br/files/edufu_a_trajetoria_da_cana-de-acucar_no_brasil_2020_ficha_corrigida.pdf

SAGAN, Carl. **Seeking Other Worlds (Profile of Carl Sagan)**. 1977. Quote Page 53, Newsweek, Inc., New York.

SAGAN, Carl. **Why We Need To Understand Science**. 1990. Artigo publicado no The Skeptical Inquirer.

SILVA, Livia. **A produção açucareira no al-Andaluz: características e etapas (séculos X ao XV)**. Revista do Departamento de História da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/cadernosdehistoriaufpe/article/view/110056/21979>

UMANS, Stephen. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708 p.

WYLEN, V.; BORGNACKE, G. J.; SONNTAG, C. R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.