

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Leandro Yudi Gomes

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROTEÇÃO E OPERAÇÃO DO GRUPO GERADOR DE 10 MVA PARA
TESTES DE TRANSFORMADORES**

Ilha Solteira, 2025

Leandro Yudi Gomes

**PROTEÇÃO E OPERAÇÃO DO GRUPO GERADOR DE 10 MVA PARA
TESTES DE TRANSFORMADORES**

Trabalho de Graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista – UNESP
Campus de Ilha Solteira, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jean Marcos de Souza

Ribeiro

Ilha Solteira, 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G633p Gomes, Leandro Yudi.
Proteção e operação do grupo gerador de 10 MVA para testes de transformadores / Leandro Yudi Gomes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
58 f. : il.

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

Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro

Inclui bibliografia

1. Grupo gerador. 2. Controlador lógico programável. 3. Proteção elétrica. 4.
Interface homem-máquina. 5. Ensaios em transformadores.

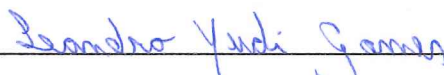
ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e nove dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **Leandro Yudi Gomes**, matriculado sob o nº 181050528, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro*, o *Prof. Dr. Carlos Antonio Alves* e o *Dr. Rodrigo Serra Daltin*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**PROTEÇÃO E OPERAÇÃO DO GRUPO GERADOR DE 10MVA PARA TESTES DE TRANSFORMADORES**", obtendo a nota 9,5 (NOVE E MEIO) e conceito Aprovado.



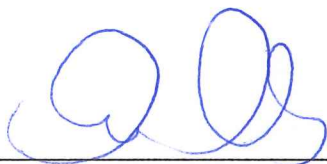
Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro

- orientador -



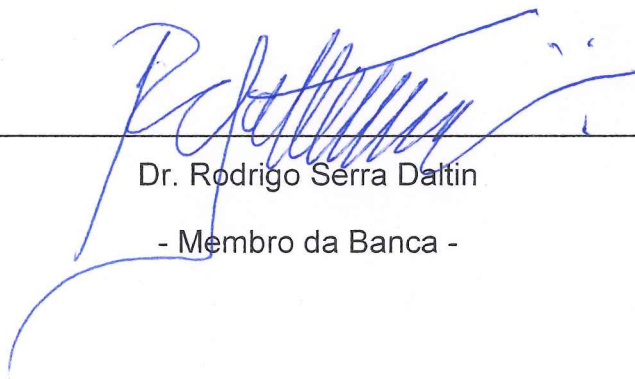
Leandro Yudi Gomes

- discente -



Prof. Dr. Carlos Antonio Alves

- Membro da Banca -



Dr. Rodrigo Serra Daltin

- Membro da Banca -

Agradecimentos

Agradeço profundamente aos meus pais por toda a dedicação, esforço e amor com que lutaram para proporcionar a mim e meus irmãos tantas conquistas. Deixo aqui registrada a minha imensa gratidão.

Resumo

Este Trabalho de Graduação tem como objetivo apresentar a modernização do sistema de proteção e operação do grupo gerador de 10 MVA utilizado para testes em transformadores. O sistema é composto por um motor de corrente contínua de 1800 kW que aciona um gerador síncrono com tensão nominal de 6,6 kV, operando em frequências de 50 e 60 Hz. A excitação do gerador principal é realizada por meio de um gerador CC auxiliar, cuja corrente de campo é controlada por circuitos Chopper comandados por um Controlador Lógico Programável (CLP). O projeto abordou a substituição dos cubículos de média tensão de alimentação, saída e neutro, bem como a atualização dos painéis de controle e automação, com foco na integração do CLP e da Interface Homem-Máquina (IHM). A metodologia envolveu o desenvolvimento da lógica de controle do sistema, configuração dos relés de proteção e implementação de uma interface supervisória para operação segura e eficiente. O sistema foi submetido a testes a frio, a quente e sob operação com carga, incluindo ensaios a vazio e de curto-circuito, demonstrando conformidade com os parâmetros esperados e eficácia das proteções implementadas. Este trabalho contribui para o aumento da confiabilidade e disponibilidade do grupo gerador, garantindo a integridade dos equipamentos durante os ensaios laboratoriais de transformadores.

Palavras-chave: Grupo Gerador; Controlador Lógico Programável; Proteção Elétrica; Interface Homem-Máquina; Ensaios em Transformadores.

Abstract

This Graduation Project aims to present the modernization of the protection and operation system of a 10 MVA generator set used for transformer testing. The system consists of a 1800 kW DC motor that drives a synchronous generator with a nominal voltage of 6.6 kV, operating at both 50 and 60 Hz. The excitation of the main generator is provided by an auxiliary DC generator, whose field current is controlled by Chopper circuits governed by a Programmable Logic Controller (PLC). The project encompassed the replacement of medium-voltage feeder, output, and neutral cubicles, as well as the upgrade of control and automation panels, emphasizing the integration of the PLC and Human-Machine Interface (HMI). The methodology involved the development of the control logic, configuration of protection relays, and implementation of a supervisory interface to ensure safe and efficient operation. The system underwent de-energized, energized, and loaded tests, including open-circuit and short-circuit trials, demonstrating compliance with expected parameters and the effectiveness of the implemented protections. This work contributes to enhancing the reliability and availability of the generator set, ensuring equipment integrity during laboratory transformer tests.

Keywords: Generator Set; Programmable Logic Controller; Electrical Protection; Human-Machine Interface; Transformer Testing.

Lista de Abreviaturas

AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i> (Regulador Automático de Tensão)
C.A	Corrente Alternada
C.C	Corrente Continua
CAV	Característica a vazio
CBMT-G10MVA	Cubículo de Média Tensão de Saída do Gerador - 10MVA
CBMT-TR2MVA	Cubículo de Média Tensão Alimentador - TR 2MVA
CBNT-G10MVA	Cubículo de Neutro - G10MVA
CCC	Característica de curto circuito
FCR	<i>Field Current Regulator</i> (Regulador de corrente de Campo)
G10MVA	Gerador de 10 Megavoltampere
MVA	Megavoltampere
PAC-G10MVA	Painel de Acionamento e Controle - G10 MVA
PBT-EXG10MVA	Painel de Baixa Tensão - Acionamento das Excitatrizes G10 MVA
PBT-FLDG10MVA	Painel de Baixa Tensão - Contator de Campo G10 MVA
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência
TR2MVA	Transformador de 2 Megavoltampere

Lista de Figuras

Figura 1 - Arquitetura do CLP	9
Figura 2 – Curva de magnetização.....	13
Figura 3 - Característica a vazio.....	14
Figura 4 - Característica de curto circuito	14
Figura 5 - Circuito equivalente do gerador em curto circuito	15
Figura 6 - Campo e armadura do motor CC	16
Figura 7 - Pontes Retificadoras Monofásicas	18
Figura 8 - Pontes Retificadoras Trifásicas	18
Figura 9 - Circuito Chopper.....	19
Figura 10 - Sinóptico das fontes para ensaios	22
Figura 11 - G10MVA.....	23
Figura 12 - Sinóptico das conexões do gerador	23
Figura 13 - Sinóptico das conexões com o Motor CC	24
Figura 14 - Sinóptico com alimentação do Drive	24
Figura 15 - Sinóptico da excitação G10MVA.....	25
Figura 16 - Sinóptico G10MVA.....	25
Figura 17 - Tela de Operação e Controle do supervisório	28
Figura 18 - Unifilar original do G10MVA	32
Figura 19 - Unifilar da primeira modernização G10MVA.....	32
Figura 20 - Unifilar da segunda modernização G10MVA	34
Figura 21 - Unifilar da atual G10MVA	35
Figura 22 - Sequencia de partida.....	36
Figura 23 - Pré-condições da sequência de partida.....	36
Figura 24 - Sequência de parada	37
Figura 25 - Pré-condições da sequência de parada	37
Figura 26 - Tela de Medições.....	38
Figura 27 - Diagrama de controle	39
Figura 28 - Incremento e decremento do setpoint da excitação do Motor CC.....	40
Figura 29 - Sinal de erro da excitação do Motor CC	41
Figura 30 - Sinal de controle da excitação do Motor CC	41
Figura 31 - Diagrama do Controle de Excitação do G10MVA.....	42

Figura 32 - Ponto de ajuste da excitação do G10MVA no modo FCR.....	436
Figura 33 - Sinal de erro e bloco de controle PI da excitação do G10MVA modo FCR	45
Figura 34 - Conversão do sinal de controle e seleção entre as saídas dos AVR's 2 e 3 ..	45
Figura 35 - Ensaio a vazio	51
Figura 36 - Teste de Curto Circuito	52

Lista de Quadros

Quadro 1 - Funções de proteção G10MVA.....	19
Quadro 2 - Verificação das funções de proteção G10MVA.....	48

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Teste a vazio G10MVA	50
Tabela 2 - Teste de Curto Circuito G10MVA	52
Tabela 3 - Teste de curto circuito bifásico 50Hz	53
Tabela 4 - Teste de curto circuito bifásico 60Hz	54

Sumário

1. Revisão bibliográfica	8
1.1. Sistemas de controle	8
1.1.1. Arquitetura do controlador lógico programável	8
1.2. Máquinas elétricas	11
1.2.1. Conversão de energia	11
1.2.2. Geradores Síncronos	12
1.2.3. Motores de corrente contínua	15
1.2.4. Controle de velocidade e torque do motor CC	16
1.3. Pontes retificadoras controladas	17
1.4. Circuito Chopper	18
1.5. Funções de Proteção	19
2. Introdução	22
3. Materiais e métodos	27
3.1. Metodologia	27
3.1.1. Operação	27
3.1.2. Sequência de partida e parada	35
3.1.3. Tela de medições	38
3.1.4. Tela de eventos	39
3.2. Controle	39
3.2.1. Controle da corrente de excitação do motor CC de 1800kW (FCR 1)	39
3.2.2. Controle da excitação do G10MVA	42
4. Testes Realizados	Error! Bookmark not defined.
4.1. Teste a frio	47
4.2. Teste a quente com G10MVA parado	47
4.3. Teste a quente com G10MVA girando	47
4.3.1. Proteções	47
5. Resultados	50
5.1. Teste a vazio	50
5.2. Teste de curto circuito	52
5.3. Teste de curto circuito bifásico	53
6. Conclusão	54
7. Bibliografia	56

1. Revisão bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos, teorias e abordagens relacionadas ao tema desta pesquisa. A partir dessa base teórica, busca-se oferecer uma visão crítica dos elementos que compõem o fenômeno investigado, estabelecendo conexões entre os referenciais adotados e os objetivos deste trabalho.

1.1 Sistemas de controle

Um sistema de controle é um conjunto de componentes, interconectados, que gera uma configuração capaz de prover uma resposta desejada pelo sistema. Pode ser tão simples como uma porta automática que se abre quando seu sensor de presença detecta alguém, assim como pode ser complexo envolvendo os processos de operação de uma planta industrial.

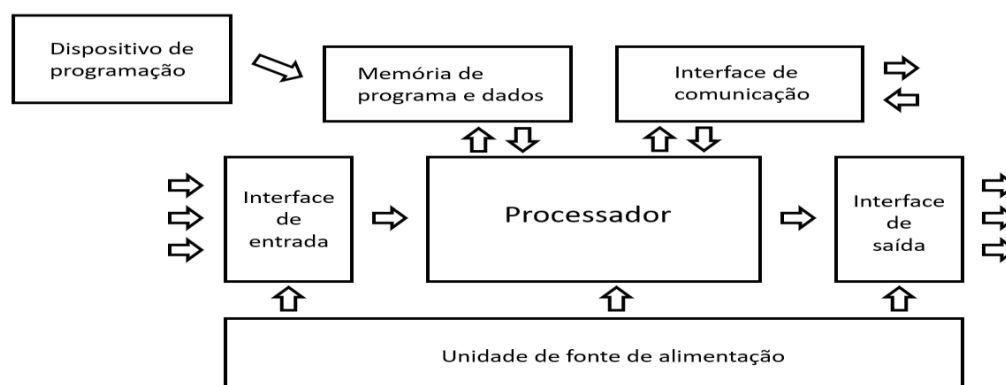
O princípio do primeiro exemplo é o do chaveamento, quando o sensor identifica a presença de alguém a sua resposta é fechar um contato que liga o motor fazendo a porta se abrir, quando a porta se abre um segundo contato é acionado indicando o fim de curso da porta, que por sua vez fecha a porta com um temporizador. O exemplo da planta industrial é bem mais complexo, neste caso é necessário a aplicação de um controlador lógico programável (CLP), que é um controlador microprocessado que pode armazenar em sua memória instruções para implementar funções como lógica booleana, sequenciamento, temporização, contagem, aritmética e funções de controle proporcionais, integrais e derivativos.

1.1.1 Arquitetura do controlador lógico programável.

De forma geral, um sistema CLP tem os componentes funcionais básicos da unidade do processador, memória, unidade de fonte de alimentação, seção de interface de entrada/saída, interface de comunicação e o dispositivo de programação (Bolton, 2006).

Na Figura 1 é mostrado o arranjo básico.

Figura 1 - Arquitetura do CLP



Fonte: Adaptado de (Bolton, 2006)

O dispositivo de programação faz a conversão do programa desenvolvido pelo programador para a linguagem de máquina, fazendo a compilação e o envio do código para a memória que armazenará o programa. Alguns CLPs exigem apenas que o computador tenha software apropriado; outros requerem placas de comunicação especiais para interface com o CLP. A programação geralmente é feita em um software específico que tem uma interface de programação, esse programa pode ser desenvolvido em gráfico de função contínua, diagrama de blocos funcionais, diagrama lógico ladder, gráfico de função sequencial ou texto estruturado.

A unidade de memória é responsável por armazenar o programa que será executado pelo processador, assim como armazenar informações temporárias para o tratamento de dados e salvar informações que devam ser utilizadas em um longo período como registros (Bolton, 2006).

Existem alguns tipos de elementos de memória em um sistema CLP:

O sistema de memória apenas de leitura (*read-only-memory* - ROM) é a parte da memória na qual as informações são gravadas pelo fabricante e não podem ser alteradas ou apagadas apenas acessadas, nelas contém o sistema operacional e dados fixos usados pelo processador.

As Memórias de Acesso Aleatório (*Random Access Memories* - RAMs) são empregadas para armazenamento temporário de programas e dados. Parte dessa memória será reservada

para endereços de entrada e saída e os estados dessas entradas e saídas assim como os valores de temporizadores, contadores e outros dispositivos internos.

Os programas e dados na RAM podem ser alterados pelo usuário. Todos os CLPs terão alguma quantidade de RAM para armazenar programas que foram desenvolvidos pelo usuário e dados do programa. No entanto, para evitar a perda de programas quando a fonte de alimentação é desligada, uma bateria é usada no CLP para manter o conteúdo da RAM por um período de tempo (Bolton, 2006).

A capacidade de armazenamento de uma unidade de memória é determinada pelo número de palavras binárias que ela pode armazenar. Assim, se um tamanho de memória é de 256 palavras, então ele pode armazenar $256 \times 8 = 2048$ bits se palavras de 8 bits são usadas e $256 \times 16 = 4096$ bits se palavras de 16 bits são usadas. (Bolton, 2006).

As entradas/saídas são o meio de comunicação com outros dispositivos, podendo ser informações digitais ou analógicas. Por meio das entradas digitais podemos saber se algum equipamento está ligado ou desligado se alguma válvula está aberta ou fechada e com as saídas digitais podemos fazer chaveamentos comandando esses dispositivos. As informações analógicas nos trazem informações sobre grandezas quantitativas, como velocidade, posição, tensão, corrente, grandezas que podemos usar como referência para fazer aplicações de controle e atuar nas saídas. Cada ponto de entrada/saída tem um endereço único que pode ser usado pela CPU, cada endereço é configurado para atribuir o seu estado ou valor para uma variável dentro do programa.

A interface de comunicação possibilita o tráfego de informações além das pré-estabelecidas no hardware de entrada e saída do CLP. Por meio dessa interface podemos trabalhar com diversos outros dispositivos, como banco de dados, sistemas de alarmes, interface homem máquina (IHM), supervisório, reles de proteção entre outros.

A comunicação entre diferentes dispositivos é feita por meio de um protocolo de comunicação específico que seja compatível com todos os dispositivos conectados. O protocolo de transmissão de dados é um conjunto de regras, padrões e especificações técnicas que regulam a transmissão de dados entre unidades de processamento diferentes, permitindo a detecção e correção de erros. Alguns exemplos de protocolos de comunicação são *modbus*, *CANopen*, *OPC*, *Profibus* e *EtherNet/IP*.

Para a operação de diversos sistemas é necessário a aplicação de IHMs, por meio dessas é que ocorre a visualização e interferência por parte do operador nos processos. Essas interfaces podem ser um conjunto de sinalizadores de status, medidores analógicos e botões de acionamentos ou em opções mais modernas podem ser telas sensíveis ao toque que são programadas e preparadas para apresentar todos os status, medições, alarmes e comandos.

O processador ou CPU (*central processing unit*) é a unidade que interpreta os comandos do código de programação para fazer a leitura das entradas, tratar as informações, executar as operações lógicas e de controle para então comandar as saídas.

1.2 Máquinas elétricas

As máquinas elétricas desempenham um papel fundamental na conversão de energia elétrica em energia mecânica e vice-versa, sendo amplamente utilizadas em diversos setores da indústria, transporte, geração e distribuição de energia. Esses dispositivos, que incluem motores, geradores e transformadores, são essenciais para o funcionamento de sistemas eletromecânicos e para a automação de processos industriais.

1.2.1 Conversão de energia

A conversão eletromagnética de energia ocorre quando surgem alterações no fluxo concatenado decorrentes do movimento mecânico. Nas máquinas rotativas, as tensões são geradas nos enrolamentos ou grupos de bobinas quando estes giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou quando um campo magnético gira mecanicamente próximo aos enrolamentos, ou ainda quando o circuito magnético é projetado de modo que a relutância varie com a rotação do rotor. Por meio desses métodos, o fluxo concatenado em uma bobina específica é alterado ciclicamente e uma tensão variável no tempo é gerada (Umans, 2014).

Um grupo dessas bobinas, conectadas em conjunto, é referido normalmente como enrolamento de armadura. Em geral, o termo enrolamento de armadura de uma máquina rotativa é usado para se referir a um enrolamento ou grupo de enrolamentos que conduzam corrente alternada. Em máquinas CA, tais como as síncronas ou as de indução, os enrolamentos de armadura alojam-se geralmente na parte estacionária da máquina conhecida como *estator*, caso em que esses enrolamentos podem ser referidos também como enrolamentos de estator (Umans, 2014).

Assim, um gerador transforma a energia mecânica na máquina primária em energia elétrica. Geralmente esse processo é realizado transformando a energia potencial gravitacional da água em usinas hidrelétricas ou transformando a energia liberada na queima de biocombustível para gerar vapor em caldeiras e alimentar turbogeradores. Nestes casos o interesse é a geração de energia elétrica. Porém no caso deste trabalho o interesse é ter uma fonte de tensão e controlada e ajustável para a realização dos testes dos transformadores, por isso é utilizado um motor CC para fornecer a energia mecânica para o gerador.

Nos geradores síncronos, a excitação pode ser feita de duas formas com base no seu próprio valor da corrente de excitação ou com base no valor da tensão na saída do gerador. O controle com base no próprio valor da corrente de campo também pode ser chamado de FCR, do inglês *Field Current Regulator*, esse modo é mais simples e apenas fixa um valor na corrente de campo, porém se a carga for alterada ocorrerá uma variação na tensão do gerador. A excitação controlada com base na tensão supre essa deficiência uma vez que o sistema altera a corrente de excitação de acordo com o valor da tensão na saída do gerador, esse modo também é chamado de AVR, do inglês *Automatic Voltage Regulator* (Regulador de tensão automático).

1.2.2 Geradores Síncronos

De acordo com Chapman (2013), a frequência elétrica produzida por um gerador síncrono, por definição, está sincronizada ou vinculada à velocidade mecânica de rotação do gerador, obedecendo a equação 1:

$$f = \left(\frac{\text{Polos}}{2} \right) \times \frac{n}{60} \text{ Hz} \quad (1)$$

em que f = frequência elétrica medida em Hz,

Polos = número de polos,

n = velocidade mecânica do campo magnético, em rpm (igual à velocidade do rotor nas máquinas síncronas)

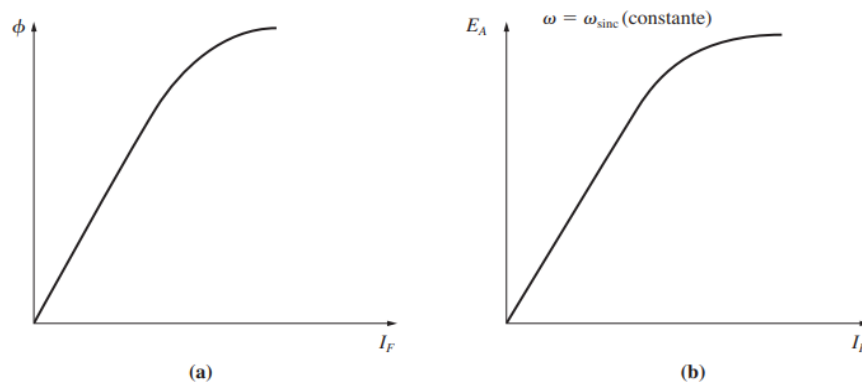
Chapman diz também que o valor da tensão induzida em uma das fases do gerador é dado pela equação 2:

$$E_a = K\phi\omega \quad (2)$$

Pois a tensão depende do fluxo ϕ da máquina, da velocidade angular ω e da construção da máquina que de forma simplificada é representado pela constante K .

Assim, para valores constantes de velocidade angular da máquina, que é proporcional à sua frequência, a tensão interna gerada E_a é diretamente proporcional ao fluxo, que por sua vez depende da corrente que flui no circuito de campo do rotor. Por tanto, a corrente I_f do circuito de campo relaciona-se com o fluxo, conforme mostra a Figura 2(a). Como E_a é diretamente proporcional ao fluxo, a tensão interna gerada E_a relaciona-se com a corrente de campo, conforme está mostrado na Figura 2(b). Esse gráfico é denominado curva de magnetização ou característica a vazio (CAV) da máquina.

Figura 2 – Curva de magnetização



Fonte: (Chapman, 2013)

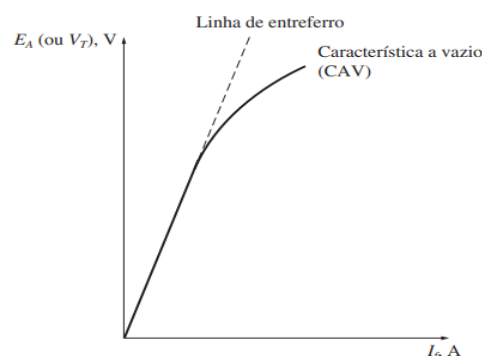
Ao realizar um ensaio a vazio (ou de circuito aberto) com o gerador é possível observar as características a vazio.

Para realizar esse ensaio, o gerador é colocado a girar na velocidade nominal, os terminais são desconectados de todas as cargas e a corrente de campo é ajustada para zero. A seguir, a corrente de campo é incrementada gradualmente e a tensão nos terminais é medida a cada passo. Com os terminais abertos, a corrente de armadura é nula, de modo que E_a é igual a V . Assim, a partir dessa informação, é possível construir um gráfico de E_a (ou V_T) versus I_f . Essa curva é assim denominada característica a vazio (CAV) de um gerador. Com essa curva característica, é possível encontrar a tensão gerada interna do gerador para qualquer corrente de campo dada.

Uma característica a vazio típica está mostrada na Figura 3. Observe que, no início, a curva é quase perfeitamente reta até que alguma saturação é observada com correntes de campo elevadas.

O ferro não saturado da máquina síncrona tem uma relutância desprezível em relação à do entreferro. Desse modo, no início, a maior queda da força magnetomotriz ocorre no entreferro devido à sua alta relutância de forma que o incremento de fluxo resultante é linear. Quando o ferro finalmente satura, a relutância do ferro aumenta drasticamente e o fluxo aumenta muito mais vagarosamente com o aumento da força magnetomotriz. A relação linear esperada entre tensão induzida e corrente de campo, caso não houvesse saturação do ferro é denominada de linha de entreferro.

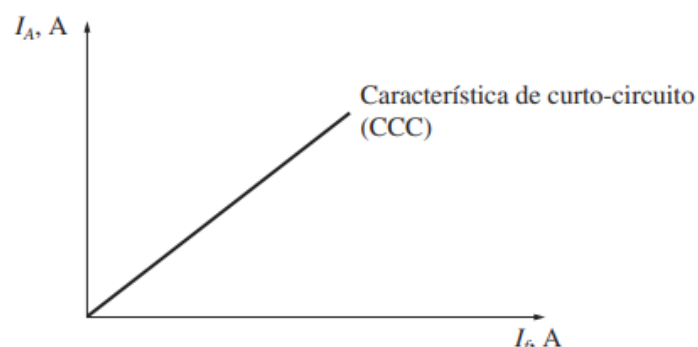
Figura 3 - Característica a vazio



Fonte: (Chapman, 2013)

Outra característica importante é a de curto circuito, que está apresentada na Figura 4. Para fazer um ensaio de curto circuito é necessário colocar em curto-circuito os terminais do gerador e pedir a corrente de armadura ao passo que se incrementa a corrente de campo.

Figura 4 - Característica de curto circuito



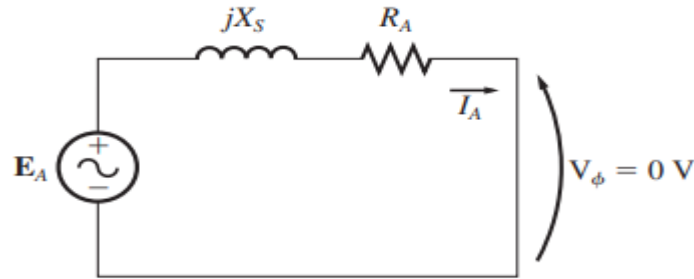
Fonte: (Chapman, 2013)

A curva característica do ensaio de curto circuito é basicamente uma linha reta, pela análise do circuito equivalente mostrado na Figura 5, no qual temos que a corrente de armadura

I_a é numericamente igual à razão entre a tensão de armadura e a impedância ($R_a + jX_s$), pode-se chegar na expressão da equação 3 que mostra que a relação entre a corrente de armadura é proporcional à tensão induzida:

$$I_a = \frac{E_a}{R_a + jX_s} \quad (3)$$

Figura 5 - Circuito equivalente do gerador em curto circuito



Fonte: (Chapman, 2013)

Como para velocidades constantes o valor de E_a é proporcional ao fluxo magnético, que por sua vez é proporcional à corrente de campo, a proporção entre a corrente de armadura e a corrente de campo no ensaio de curto circuito. Por isso a curva característica é uma linha reta.

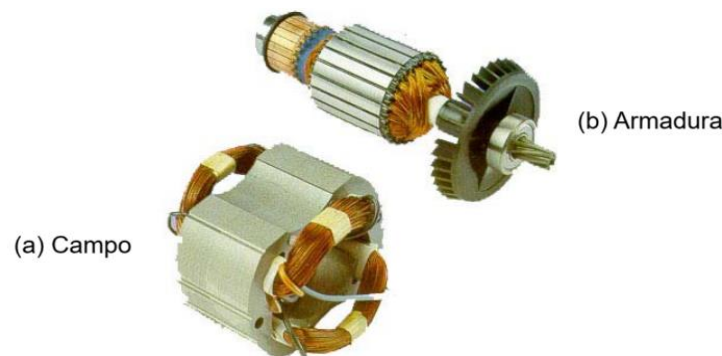
Para velocidade constante, E_a é proporcional ao fluxo magnético, e o fluxo é aproximadamente proporcional à corrente de campo. Consequentemente a corrente de campo é proporcional à corrente de campo no teste de curto-circuito, resultando em uma curva característica linear.

1.2.3 Motores de corrente contínua

Segundo Fuentes (2005), os motores de corrente contínua foram os primeiros a serem utilizados na indústria e se destacam pela simplicidade em se controlar sua velocidade e torque.

O motor de corrente contínua é formado pelo campo, armadura, comutador e escovas. Aprofundando, o campo (ou estator) é a parte fixa, que possui as sapatas polares entorno das quais se enrolam os fios condutores que formam as bobinas. A armadura (ou rotor) é a parte móvel, este possui um pacote de lâminas de aço silício com ranhuras nas quais são alocadas as bobinas do rotor, que por sua vez estão conectadas ao coletor. O campo e a armadura estão expostos na Figura 6.

Figura 6 - Campo e armadura do motor CC



Fonte: (Fuentes, 2005)

Sobre o funcionamento do motor de corrente contínua, Fuentes afirma que a etapa é a produção do fluxo magnético do campo. Isso é feito aplicando uma corrente contínua nas bobinas do estator, que fazem surgir polos magnéticos ao redor das sapatas polares que passam a ser ímãs com polaridades fixas.

Uma segunda fonte de corrente contínua deve ser utilizada para circular corrente através das bobinas da armadura, produzindo os polos magnéticos do rotor. Os polos do rotor são atraídos pelos polos estator resultando em uma força magnética. Como o rotor é uma peça móvel a força magnética entre estator e rotor faz com que o rotor se desloque buscando uma condição de equilíbrio. Porém com o deslocamento mudam os contatos entre as escovas e o coletor assim, novas bobinas são energizadas produzindo uma nova força magnética. O resultante destas forças magnéticas atuando sobre o rotor e o seu movimento rotacional é chamado de conjugado motor (Fuentes, 2005).

Os motores de corrente contínua podem ser classificados de acordo com a configuração das bobinas utilizadas para produzir o campo magnético. Eles podem ser auto excitados com excitação em série, paralelo ou composta, ou ainda com excitação independente. No caso deste trabalho o motor possui excitação independente.

1.2.4 Controle de velocidade e torque do motor CC

Segundo Fuentes (2005), este tipo de motor possui três formas de controle de velocidade e torque, sendo eles: o controle pela tensão aplicada na armadura, o controle pela tensão aplicada no campo e o controle por adição de resistência na armadura.

Controle pela tensão de aplicada na armadura:

No controle pela armadura mantém-se a tensão e a corrente no campo constante, dessa forma o fluxo magnético produzido no campo é constante. Varia-se a tensão aplicada na armadura e por consequência a rotação da máquina, seguindo uma relação direta entre tensão de armadura e a rotação da máquina. Neste método o torque permanece constante e a potência varia proporcionalmente com a velocidade (Fuentes 2005).

Controle pela tensão aplicada no campo:

No controle pelo campo, mantém-se a tensão de armadura constante e varia-se a corrente de excitação. Como o fluxo magnético é proporcional a corrente de excitação, diminuindo-se a corrente de excitação diminui-se o fluxo magnético e aumenta-se a velocidade de rotação da máquina. No controle de campo a potência permanece constante enquanto a rotação de eleva e o torque reduz. Este processo de aumento da velocidade de rotação pela diminuição do fluxo é conhecido como enfraquecimento de campo (Fuentes, 2005).

Controle por adição de resistência na armadura:

Além dos métodos de controle pelo campo e controle pela armadura, verifica-se que variando a resistência de armadura também se obtém uma variação na velocidade do motor. Para conseguir esta variação coloca-se em série um reostato com a armadura do motor e através da variação do valor do reostato consegue-se variar a velocidade do motor. Neste método existe uma perda considerável de energia devido á potência dissipada no reostato adicional (Fuentes, 2005).

Pode-se também fazer uma combinação dos dois primeiros métodos possibilitando alterar o conjugado e a rotação.

1.3 Pontes retificadoras controladas

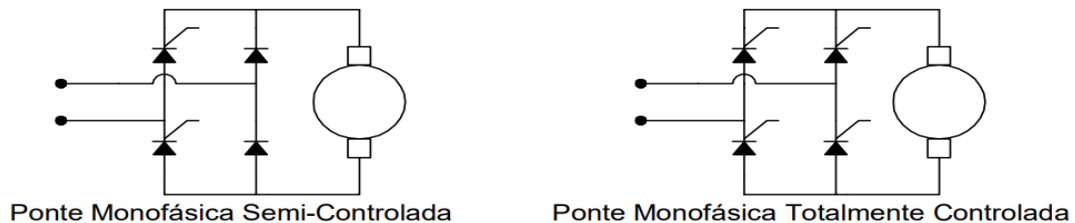
Para fornecer as tensões que são aplicadas nos sistemas de controle podem ser utilizadas pontes retificadoras controladas. Que são equipamentos capazes de realizar a conversão de corrente alternada para corrente contínua controlando o nível de tensão.

As pontes podem ser monofásicas ou trifásicas e semicontroladas ou totalmente controladas.

Conforme indica Fuentes (2005), a ponte monofásica semicontrolada é formada por dois tiristores e dois diodos retificadores, esta configuração é aplicada em acionamentos de

baixa potência por motivos econômicos. Já a ponte monofásica totalmente controlada é composta por quatro transistores, e também é aplicado em acionamentos de baixa potência, nas quais é necessário a frenagem do motor CC, conforme ilustrado na Figura 7.

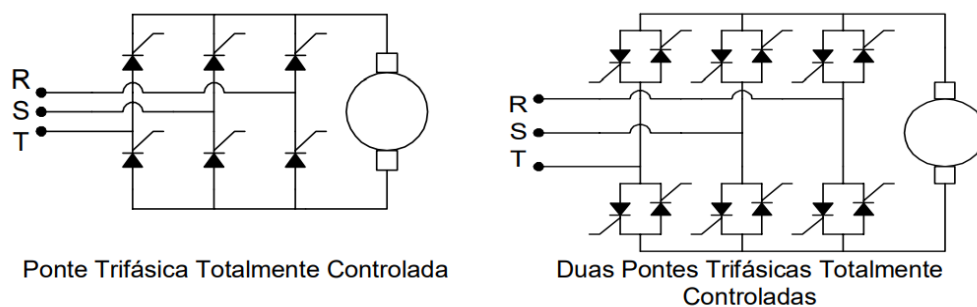
Figura 7 - Pontes Retificadoras Monofásicas



Fonte: (Fuentes, 2005)

A ponte trifásica totalmente controlada é composta por seis tiristores, como pode ser observado na Figura 8, esta configuração é aplicada em acionamentos de potência superior a 10kW nas quais é necessário acelerar e frear o motor em um único sentido, quando for necessário a aceleração e frenagem nos dois sentidos devem ser aplicadas duas pontes completamente controladas em anti-paralelo, que está exposta também na Figura 8.

Figura 8 - Pontes Retificadoras Trifásicas



Fonte: (Fuentes, 2005)

1.4 Circuito Chopper

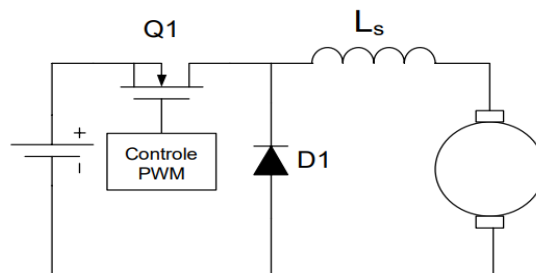
Outra forma de aplicar valores controlados de tensão CC é utilizando um circuito Chopper, que é um conversor CC-CC que opera pelo chaveamento rápido de um dispositivo semicondutor controlando a tensão média aplicada à carga. Na Figura 9, pode ser observado um circuito Chopper no qual o transistor Q1 se comporta como uma chave comandada por um circuito de controle PWM (Pulse Width Modulation). Pulse Width Modulation significa modulação na largura de pulso, essa modulação faz com que seja aplicado um valor médio de

tensão à carga proporcional à multiplicação entre a tensão de entrada do circuito Chopper e razão entre tempo ligado (t_{on}) e o período de cada ciclo do sinal ($t_{on} + t_{off}$). A razão entre o tempo ligado e o período é denominada *Duty Cycle* (D). Assim a tensão média no motor pode ser calculada de acordo com a equação 4

conforme indicado na equação 4.

O sinal PWM apresenta uma frequência constante com pulsos de largura controlados, que no caso do circuito apresentado comandará os instantes de abertura e fechamento do transistor.

Figura 9 - Circuito Chopper



Fonte: (Fuentes 2005)

Conforme Fuentes (2005), a determinação da tensão aplicada no motor é:

$$V_{motor} = D \times V_{entrada} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \times V_{entrada} \quad (4)$$

1.5 Funções de Proteção

As funções de proteção ANSI são códigos padronizados internacionalmente sendo normatizadas pelo Instituto Nacional Americano de Padrões (*American National Standards Institute - ANSI*), utilizados para identificar e classificar os diversos tipos de proteções aplicadas em sistemas elétricos de potência. Cada função é representada por um número e, em alguns casos, por letras complementares, facilitando a leitura e interpretação de diagramas e esquemas de proteção.

As funções de proteção do gerador de 10 MVA estão expostas na Quadro 1:

Quadro 1 - Funções de proteção G10MVA

Código ANSI	Função de Proteção
24	Relé de sobreexcitação ou Volts por Hertz
46	Relé de desbalanceamento de corrente de fase ou de fase reversa
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
59	Relé de sobretensão.
81	Relé de sub/sobrefrequência
87	Relé de proteção diferencial

Fonte: Próprio autor

O fluxo magnético está relacionado a razão da tensão pela frequência, assim a sobretensão ou subfrequência podem causar a sobre-excitação, função 24.

Os efeitos da sobre-excitação são o aumento da corrente de campo e o sobreaquecimento do gerador/transformador e causar a falha da isolação. Estas situações podem ocorrer no start-up/shutdown do sistema e durante rejeições de carga (Mardegan, 2010).

A função 46 protege o gerador contra sobrecorrente de sequência negativa. O rotor de um gerador pode sofrer sobreaquecimento inadmissível quando o estator está submetido à componente de sequência negativa devido ao desequilíbrio da carga elétrica alimentada, provocando tensões de fase também desequilibradas motivadas pela queda de tensão do circuito. Como se sabe, as componentes de sequência negativa induzem correntes no rotor com o dobro da frequência nominal. Como consequência, o rotor fica submetido a um torque de frenagem equivalente à elevação da carga nos terminais do gerador. Outra consequência das correntes de desequilíbrio é a vibração do conjunto motor-gerador (Mamede, 2013).

Relés de sobre corrente operam quando o valor da corrente do circuito ultrapassa um valor pré-fixado ou ajustado. Os relés de sobrecorrente podem ser instantâneos (função ANSI 50) ou temporizados (função ANSI 51) (Mardegan, 2010).

A característica dos relés de sobrecorrente é representada pelas suas curvas tempo versus corrente. Estas curvas variam em função do tipo do relé (disco de indução, estático, digital). Antigamente, na época dos relés de disco de indução, a escolha da característica do equipamento era feita no momento da compra e, assim, não era possível alterá-la. Atualmente são majoritariamente utilizados os relés digitais e a maior parte deles permite escolher a

característica tempo x corrente apenas alterando-se os parâmetros no próprio relé (Mardegan, 2010)

Relés de tensão 59, sobretensão, são aparelhos capazes de proteger sistemas submetidos a níveis de tensão superiores ao valor máximo que garantem a integridade do equipamento.

Os fenômenos de sobretensão podem surgir a partir de uma operação incorreta ou mesmo de falha do regulador de tensão. Além disso, os processos de rejeição de carga podem acarretar sobre velocidade dos geradores e o consequente surgimento de sobretensões, além das descargas atmosféricas (Mamede, 2013).

A atuação do relé deve ser realizada sobre o disjuntor do gerador e o disjuntor da excitatriz (Mamede, 2013).

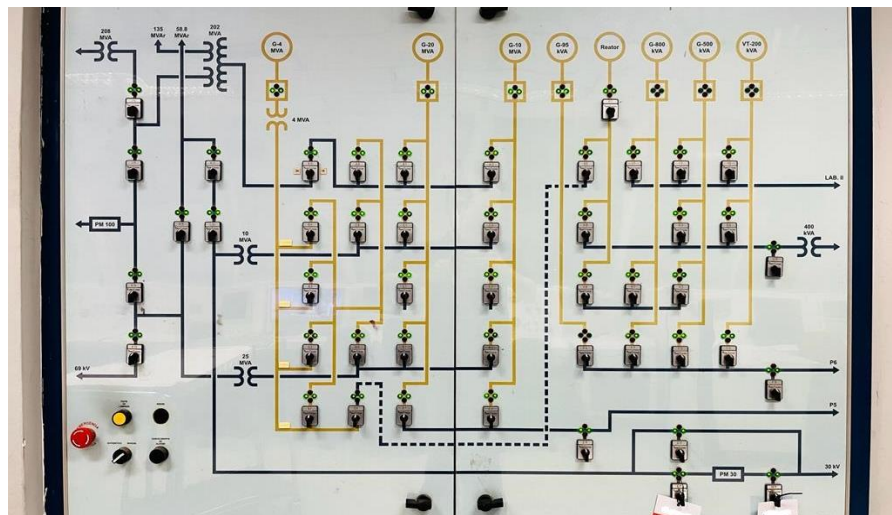
Os relés de frequência (81) podem ser ajustados tanto para atuação em situações de subfrequência como no caso de sobre frequência. Sabe-se que os geradores, quando operam em determinados instantes, fornecendo uma potência inferior à exigida pela carga, podem fornecer ao sistema frequências fora do valor nominal (Mamede, 2013).

A proteção diferencial (87) consiste em realizar a aquisição de corrente na entrada e saída do equipamento protegido para verificar se a corrente que entra é a igual à corrente que sai. Ou seja, uma diferença entre a corrente que passa pelos TCs indica que há um caminho de fuga nessa região.

2 Introdução

Para poder realizar testes em transformadores o fabricante de transformadores tem uma gama de conjuntos geradores com potências diversas que são empregados para fornecer os valores de tensão e corrente desejados para a realização dos ensaios. Na Figura 10 pode ser observado o sinóptico com as fontes disponíveis (amarelo) e as chaves utilizadas para conectar as fontes aos transformadores e aos barramentos que serão utilizados nos ensaios (azul). Em cada ensaio dever ser conectada uma fonte com a potência e a frequência compatível com os testes que serão realizados, essa conexão é feita por comandos nas chaves do sinóptico que abrem e fecham as seccionadoras dos barramentos.

Figura 10 - Sinóptico das fontes para ensaios



Fonte: Próprio autor

O grupo gerador de 10MVA é um destes conjuntos de máquinas e painéis elétricos que são utilizados para fornecer energia para testes de transformadores cuja principal máquina é o gerador síncrono de 10MVA, que pode trabalhar em 50 Hz ou 60 Hz e sua tensão de saída nominal é 6,6 kV.

Na Figura 11, pode ser visto o gerador sem suas capas de proteção. As bobinas da armadura deste gerador estão conectadas ao disjuntor de saída do sistema, no CBMT-G10MVA e o lado do neutro está sendo fechado em estrela no cubículo CBNT-G10MVA onde estão os TCs das correntes de neutro e de terra (sendo essa a somatória das correntes de neutro) e o ponto centro estrela está sendo aterrado passando por uma resistência de aterramento, quando a chave de aterramento estiver fechada.

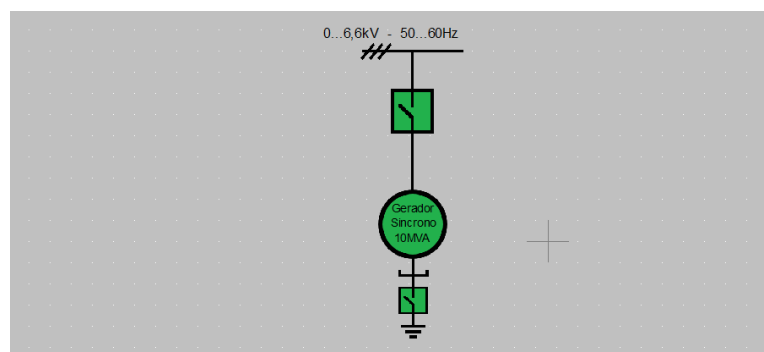
Figura 11 - G10MVA



Fonte: Próprio autor

Na Figura 12 está indicado o fechamento estrela do gerador, a existência de uma chave de aterramento e a conexão do gerador ao disjuntor de saída que está ligado à barra utilizada para alimentar os transformadores na sala de testes.

Figura 12 - Sinóptico das conexões do gerador



Fonte: Próprio autor

Um gerador síncrono simples atua como uma fonte de tensão cuja frequência é determinada pela velocidade do seu acionador mecânico primário (*máquina motriz* ou *máquina primária*) (Umans, 2014).

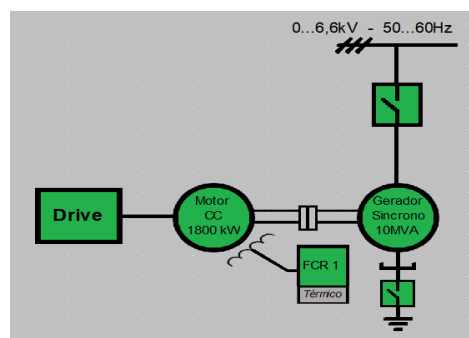
Como as máquinas CC podem proporcionar um controle de velocidade flexível este tipo de motor está sendo utilizado para fazer o acionamento mecânico do gerador de 10MVA, que deve ser capaz de ter sua frequência ajustável.

Os três métodos mais comuns de controle de velocidade de motores CC são: ajuste de fluxo, geralmente por meio do controle da corrente de campo, ajuste da resistência associada ao circuito de armadura e ajuste da tensão de terminal da armadura. Frequentemente, o controle

da tensão do motor é combinado com o controle da corrente de campo para obter a faixa de velocidade mais ampla possível (Umans, 2014).

O motor aplicado neste sistema possui circuito de excitação independente, feito diretamente por uma fonte CC instalada no painel de controle e automação, e a sua tensão de armadura é fornecida pelo Drive DCS800 DC da ABB. O controle de velocidade é feito pelo ajuste da tensão de armadura e é possível variar a corrente de campo também, porém de forma independente do controle de velocidade.

Figura 13 - Sinóptico das conexões com o Motor CC

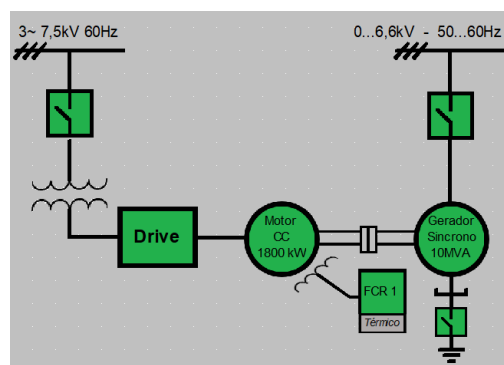


Fonte: Próprio autor

Na Figura 13 está representado o acoplamento mecânico entre motor e gerador, alimentação da armadura do motor pelo DCS800 DC (Drive) e a alimentação do campo do motor sendo feita pelo FCR1, que é um regulador de tensão.

A alimentação do Drive é feita pelo transformador de 2MVA que rebaixa a tensão de 7,5kV para 440V quando o disjuntor do alimentador é fechado. Na Figura14 pode ser observado o sinóptico com a alimentação do Drive DCS800 DC da ABB

Figura 14 - Sinóptico com alimentação do Drive

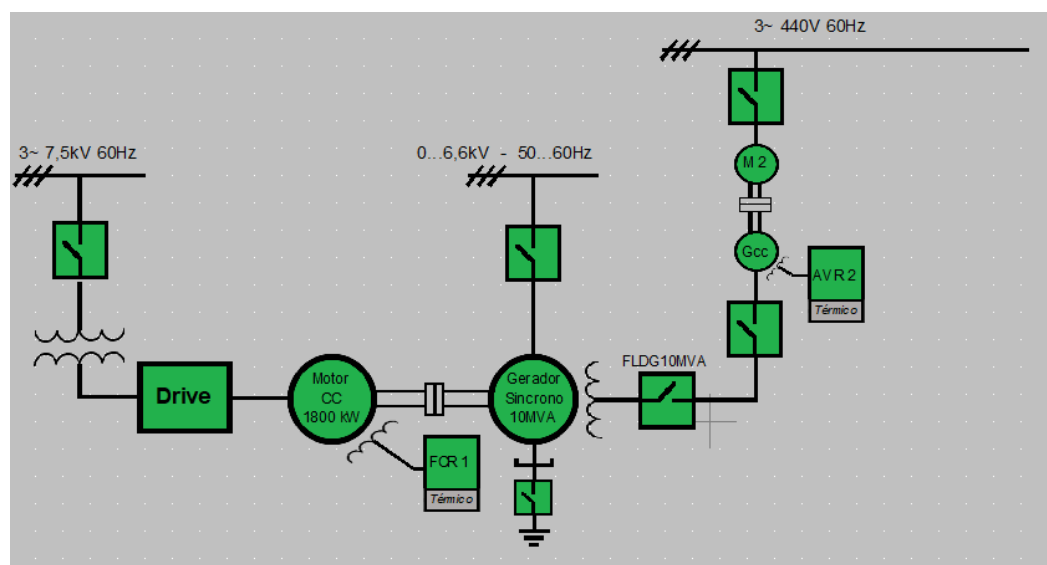


Fonte: Próprio autor

O enrolamento de campo é excitado por uma corrente contínua que é levada até ele por meio de *escovas* estacionárias de carvão que fazem contato com *anéis coletores* ou *anéis deslizantes* girantes (Umans, 2014).

Neste sistema a corrente de campo do gerador de 10MVA é fornecida por um segundo gerador, que é um gerador CC acoplado a um motor de indução trifásico. A excitação do gerador de 10MVA é controlada indiretamente para excitação do gerador CC, que é feito pelo AVR 2 (um regulador de tensão controlado pelo CLP do painel de automação). A conexão entre o os geradores para fazer a alimentação do gerador de 10MVA passa pelo contator de campo (FLDG10MVA) e por um segundo contato (abaixo do gerador CC) como está ilustrado na Figura 15

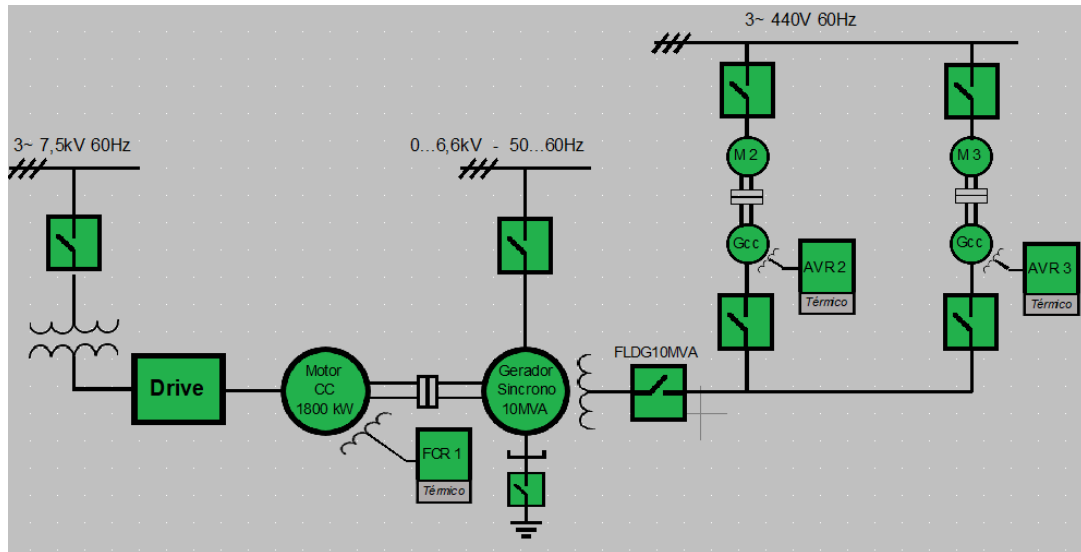
Figura 15 - Sinóptico da excitação G10MVA



Fonte: Próprio autor

Este segundo contato está atrelado a existência de um segundo grupo de motor síncrono e gerador CC que também podem ser utilizados para fazer a excitação, esse segundo contato está vinculado a uma chave seletora que conecta um dos conjuntos ao contator de campo, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Sinóptico G10MVA



Fonte: Próprio autor

No próximo capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

3 Materiais e métodos

Os materiais utilizados foram o grupo gerador de 10 MVA do laboratório de transformadores, 3 cubículos de média potência e 3 painéis

Foram utilizados também ferramentas como o notebook com os softwares para configurar os relés de proteção (AcSELerator QuickSet), desenvolver a programação do CLP (AutomatonBuilder), fazer o programa da IHM (EasyBuilder Pro) e fazer o programa do supervisório (Elipse SCADA), além de equipamentos para testes e simulações das operações do sistema.

Com base no escopo do projeto, visitas ao laboratório de transformadores e de acordo com as necessidades do cliente foi elaborada a lógica de operação e as telas da IHM, para isso foram feitos os programas do CLP AC 500 da ABB, da IHM cMT2108X2 da Weintek e do supervisório Elipse SCADA que devem se comunicar.

3.1 Metodologia

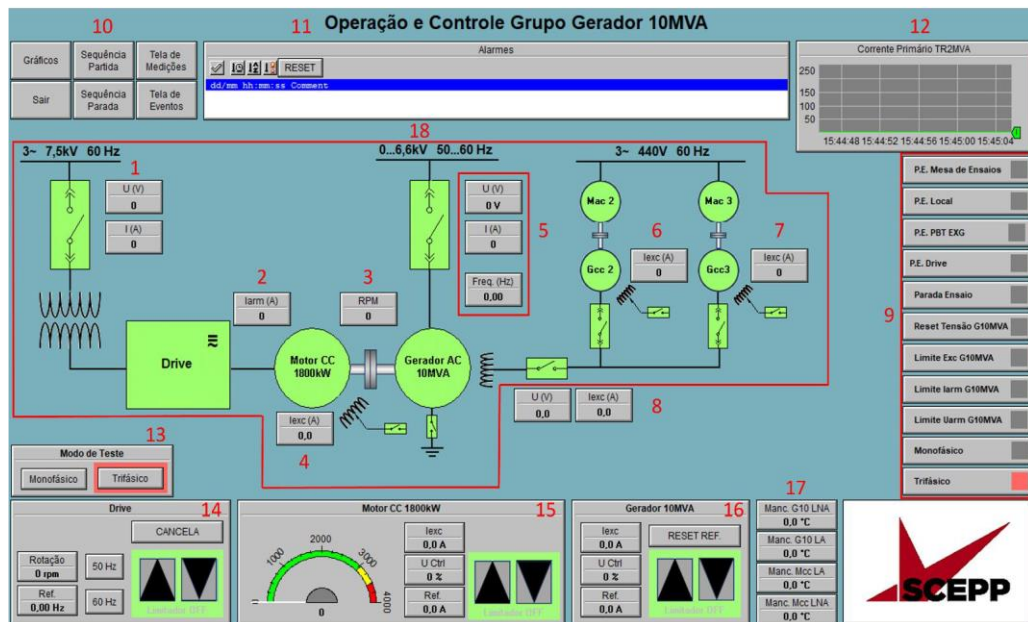
O desenvolvimento dos programas pode ser dividido em duas partes, a parte de operação, relacionada a interface com o operador e a parte de controle para determinar os valores analógicos das saídas que acionam os sistemas de excitação do Motor CC e dos geradores Gcc 2 e 3, que fazem a excitação do gerador de 10MVA.

3.1.1 Operação

Na tela de operação principal pode-se observar o sistema como um todo, ter acesso as grandezas monitoradas, alarmes, status, comandos e navegar pelos pop-ups do sistema.

Na Figura 17 é possível observar a tela de operação principal do supervisório e as respectivas informações que ela traz.

Figura 17 - Tela de Operação e Controle do supervisor



Fonte: Próprio autor.

Para descrever os elementos da tela foi atribuído números à cada grupo de objetos, sendo eles:

1. Medições de tensão e corrente no CBMT-TR2MVA;
2. Medição de corrente de armadura Motor CC 1800kW;
3. Medição de RPM do Motor CC 1800kW;
4. Medição de corrente de campo do Motor CC 1800kW;
5. Medições de tensão, corrente e frequência do G10MVA;
6. Medição da corrente de campo do Gcc 49kW (AVR2);
7. Medição da corrente de campo do Gcc 49kW (AVR3);
8. Medições de tensão e corrente de campo G10MVA;
9. Indicações gerais do sistema;
10. Acesso as telas de gráficos, partida, parada, medições e eventos;
11. Lista de alarmes;
12. Gráfico de corrente do primário do TR2MVA;
13. Seleção do modo de teste (monofásico/trifásico);
14. Comandos e medições do Drive e seleção de frequência 50Hz/60Hz;
15. Comandos da excitação do Mcc 1800kW e medições;
16. Comandos da excitação do G10MVA e medições;

17. Medições de temperaturas dos mancais;
18. Status dos componentes do sistema.

Nos itens de 1 a 8 estão apresentadas as leituras de corrente e tensão dos equipamentos, no caso dos equipamentos com três fases estão sendo exibidas apenas as leituras das fases R para o monitoramento do sistema.

Nas indicações gerais do sistema, item 9, estão os status dos botões de emergência que estão na mesa de ensaio e nos painéis PAC-G10MVA, PBT-EXG10MVA e no painel do Drive. Estão também indicados os status do botão de reset de tensão e parada de ensaio, que servem para zerar o valor definido para a corrente de campo para a excitação do G10MVA e para abrir tanto o contator de campo como a disjuntor de saída respectivamente. Os limites sinalizados mostram que não se pode mais aumentar a referência da excitação do G10MVA. Os Status monofásico ou trifásico mostram qual trip de teste está selecionado para ser realizado, quando o teste monofásico é escolhido a função de proteção 46 (desbalanço de corrente) é desabilitada. E neste item o status cinza indica não acionado e o status vermelho indica acionado.

O item 10 é o campo de acesso às demais telas do supervisório que serão mais detalhadas a diante.

Na lista de alarmes, item 11, são sinalizados os eventos ativos no momento, podendo ser o acionamento de um botão de emergência, de reset de tensão do gerador, de parada do ensaio e pode ser também o alarme ou o trip de alguma proteção. Como alguns eventos são muito rápidos a informação fica retida para que o operador possa visualiza-la e para remove-la da lista de alarmes ele deve usar o botão reset posicionado sobre a lista de alarmes.

O gráfico de corrente do primário do TR2MVA, item 12, está na tela de operação e controle para servir como referência quando a sequência de partida for executada de forma manual, para que o operador possa esperar a rede estabilizar antes de iniciar uma próxima etapa.

O campo de seleção do modo de teste, item 13, é utilizado para indicar qual tipo de teste será realizado com o sistema, quando o teste realizado for monofásico a função de proteção 46 (desbalanço de corrente) será desabilitada por uma confirmação do operador em um pop-up indicando a sua desativação.

No item 14 estão dispostas a leitura de velocidade do Motor CC e a referência que está sendo enviada para o Drive. Os Botões 50Hz e 60Hz servem tanto para selecionar o rele de

proteção que ficará ativo como para determinar a referência que será atingida pelo Drive durante a partida do Motor, este valor sobe gradualmente até atingir o valor selecionado, caso se deseje interromper este processo basta apertar o botão “cancela” que fará com que a referência do Drive fique fixa. Os botões de incremento e decremento de velocidade fazem um ajuste fino da velocidade do Motor CC.

No campo 15 estão dispostas as leituras de corrente de armadura do Motor CC (Medidor analógico) e corrente de excitação assim como os valores de referência para a corrente de excitação e o valor de controle. Nessa área também se encontram os botões de ajuste da corrente de excitação do Motor CC.

Como o motor em questão possui os enrolamentos de campo e armadura independentes, ele pode ter a sua velocidade controlada pelos dois métodos de controle, pela tensão aplicada na armadura, ou no campo.

Por mais possa ter seu controle feito de duas maneiras a operação padrão é fazer o controle unicamente pelo valor aplicado à armadura. A excitação é feita aplicando 50 amperes na no enrolamento de campo do motor, que é feita por uma ponte retificadora trifásica controlada, na sequência é energizada a armadura.

A fonte de corrente para a armadura é um Drive DCS800 DC da ABB, o painel de controle envia um sinal de referência para o Drive que controla a velocidade do motor.

No campo 16 é feito o ajuste da corrente de campo do gerador de 10MVA e podem ser visualizadas a leitura dessa corrente, a referência e o valor de controle da excitação do gerador de 10MVA. O botão “Reset Ref.” zera a referência de corrente da excitação.

Conforme mencionado na introdução deste trabalho a excitação do gerador de 10MVA é feita por um gerador CC. A excitação deste gerador CC é feita por um circuito Chopper cujo sinal de controle vem do CLP que está no painel de controle e automação. A utilização dessa estrutura para fazer a excitação do gerador de 10MVA tem relação com o histórico do desenvolvimento da eletrônica de potência.

De acordo com Vodovozov (2010), a eletrônica de potência é uma ciência jovem, os primeiros estudos no campo da eletrônica de potência datam do final do século XIX. Porém a primeira revolução eletrônica começou em 1948 com a invenção do transistor pelos cientistas John Bardeen, Walter Houser Brattain e William Bradford Shockley da “Bell Labs” que

posteriormente lhes rendeu o Prêmio Nobel. A maioria das tecnologias eletrônicas atuais só puderam ser desenvolvidas graças à essa invenção.

Vodovozov também aponta que, antes da década de 1960 a engenharia de semicondutores era considerada parte da engenharia eletrônica de baixa corrente e baixa tensão, com correntes inferiores a um ampere e tensões na casa das poucas dezenas de volts. O período dos semicondutores de potência começou em 1956, quando o tiristor baseado em silício foi inventado por uma equipe de pesquisa liderada por J. Moll da “General Electric”. O desenvolvimento de um tiristor comercial deu início à segunda revolução eletrônica. Com base nessas invenções, várias gerações de dispositivos semicondutores de potência e técnicas de conversão foram desenvolvidas.

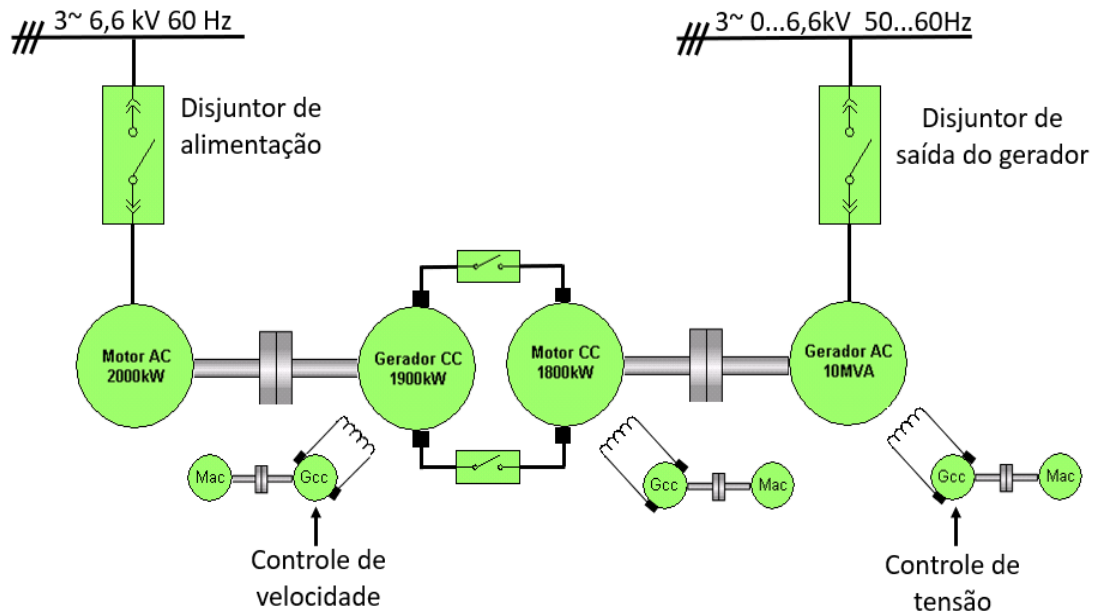
O período de 1956 a 1975 pode ser considerado como a era dos dispositivos de potência de primeira geração. Durante os anos de 1975 a 1990 foi desenvolvida a segunda geração de dispositivos de eletrônica de potência entre eles o transistor de efeito de campo semicondutor de óxido metálico, transistor bipolar npn e pnp, transistor de junção e o tiristor de desligamento de gate. Na década de 1990, os IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) foram estabelecidos como *switchs* de potência de terceira geração. Essa nova tendência em eletrônica trouxe módulos e dispositivos de energia inteligentes. Em 2010 a eletrônica de potência se mostrava um campo em rápida expansão na engenharia elétrica e o escopo da tecnologia abrange um amplo espectro de conversores elétricos (Vodovozov, 2010).

Assim percebe-se que a tecnologia aplicada em retificadores controlados para fornecer corrente continua controlada com potência elevada é recente. Quando o escopo do conjunto gerador de 10MVA foi idealizado, em meados da década de 1990, essa tecnologia ainda era muito cara e sua manutenção dependeria de uma mão de obra muito especializada. Por esse motivo o foi elaborado um projeto utilizando conjuntos de geradores CC acoplados a motores AC que eram utilizados para fornecer os elevados valores de corrente continua com uma pequena corrente de excitação, essa última vinha de circuitos eletrônicos controlados dentro dos painéis.

O Projeto original tinha um conjunto com um motor AC acoplado a um gerador CC de 1900kW para fornecer a corrente de armadura do motor CC, de forma que o controle de velocidade era feito pela excitação deste gerador. Nessa época também eram utilizados conjuntos menores de motores AC e geradores CC que faziam a excitação o motor CC de

1800kW, deste gerador de 1900kW e do próprio gerador de 10MVA, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Unifilar original do G10MVA

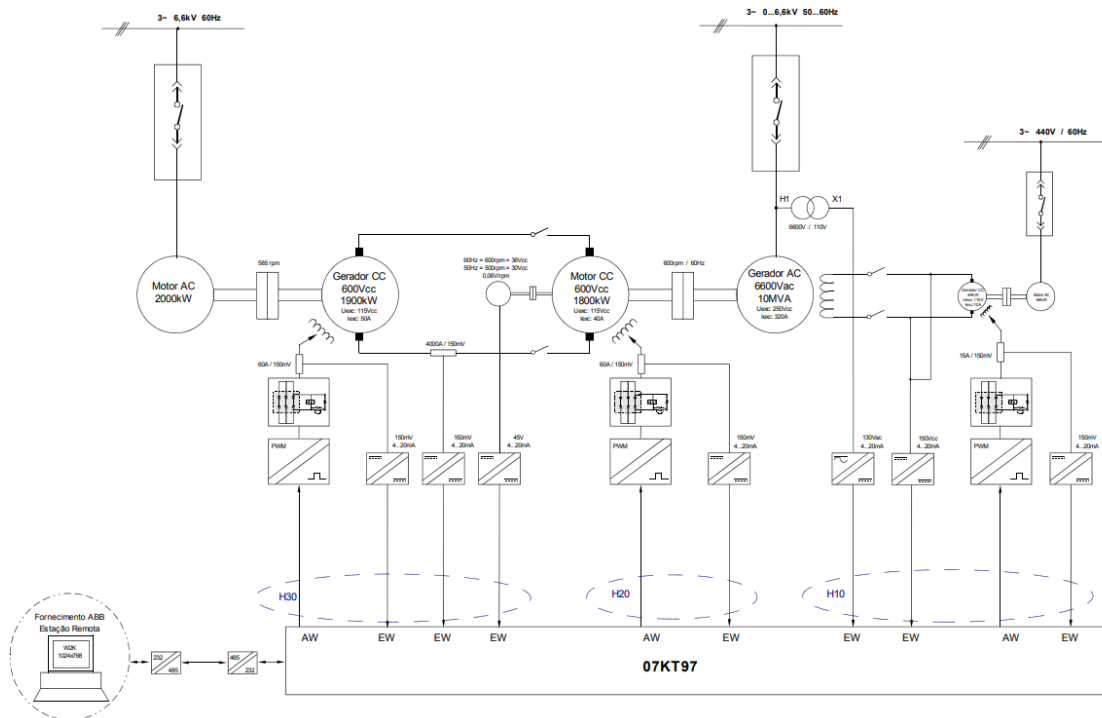


Fonte: Próprio autor.

Em 2006, foi realizada a primeira modernização no grupo gerador de 10MVA, na qual ocorreram as primeiras alterações relacionadas a eletrônica de potência. Nesta ocasião foram removidos os pequenos de motores e geradores que eram utilizados para fazer a excitação do gerador CC de 1900kW e do motor CC de 1800 kW, neste momento os circuitos choopers foram substituídos por outros com a capacidade de fornecer a corrente para excitar o gerador CC de 1900kW e o motor CC de 1800 kW diretamente, suas capacidades de fornecer corrente era na casa das dezenas de amperes.

Na Figura 19, pode ser visto o diagrama unifilar do desenho funcional desta modernização, na qual pode ser observado como ficou o sistema, e também as informações que já eram monitoradas para fazer as proteções e que iam para o sistema supervisório.

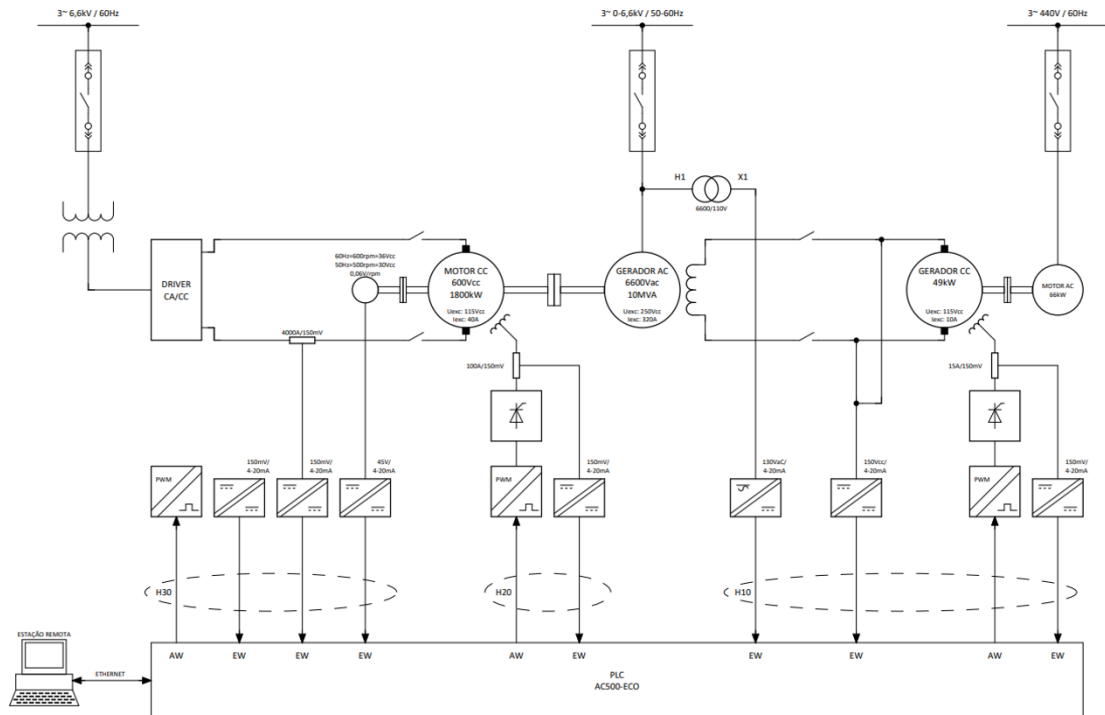
Figura 19 - Unifilar da primeira modernização G10MVA



Fonte: Próprio autor.

Com a popularização dos IGBTs e sua aplicação em conversores estes passaram a ser mais eficientes, ter maior desempenho no controle de velocidade e também ficaram mais baratos, e quanto mais popular essa tecnologia ficava mais acessível era a sua implementação. Assim, em 2017, quando foi feita uma nova modernização do sistema na qual foi substituído o conjunto motor AC de 2000kW e gerador de 1900kW por um transformador e Driver ACS800 DC da ABB. Na Figura 20, pode ser visto o diagrama unifilar do desenho funcional desta modernização.

Figura 20 - Unifilar da segunda modernização G10MVA

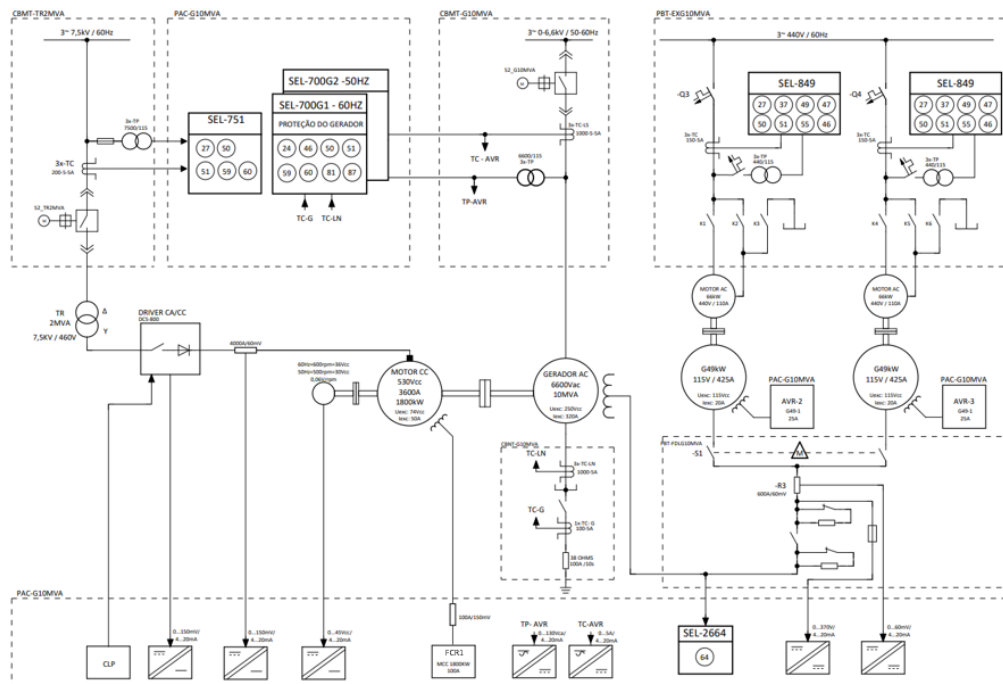


Fonte: Próprio autor.

E finalmente em 2024 foi realizada a última modernização do sistema na qual as principais alterações não estão relacionadas aos conversores e sim à proteção do grupo gerador e a modernização dos seus componentes.

Na Figura 21, pode ser visto o diagrama unifilar atual do grupo derador de 10MVA no qual as principais mudanças são a adição dos relés de proteção. Cabe resaltar também que por uma questão comercial, e de praticidade ainda foi mantido o conjunto de motor AC acoplado a um gerador CC para fornecer uma grande corrente com base na excitação do gerador por um circuito de baixa potência, e inclusive foi adicionado um conjunto reserva pois o cliente possuía as máquinas e fez essa solicitação.

Figura 21 - Unifilar da atual G10MVA



Fonte: Próprio autor.

No campo 17 estão as leituras das temperaturas dos mancais do Mcc 1800kW e G10MVA.

No item 18 a cor do ícone de cada equipamento tem o seguinte significado, verde indica que está desenergizado, vermelho significa que está energizado e amarelo que o equipamento se encontra em trip.

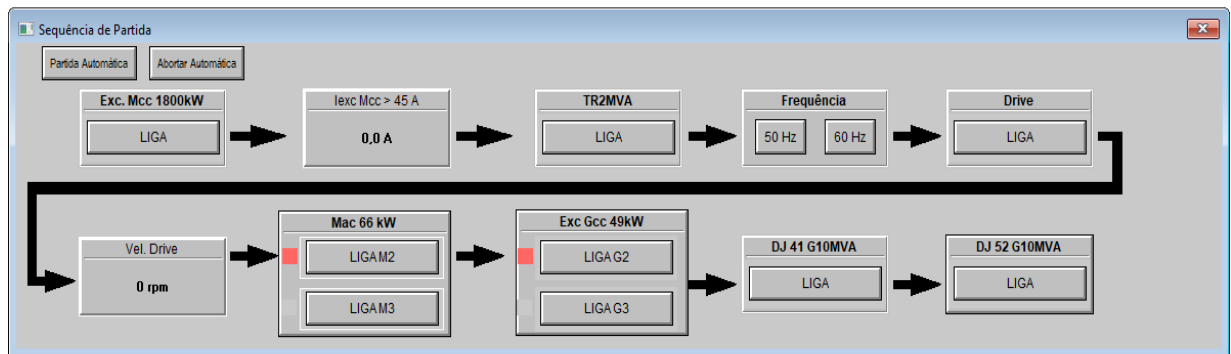
3.1.2 Sequência de partida e parada

Ao clicar na sequência de partida é aberto o pop-up mostrado na

Figura 22 que apresenta a sequência de comandos para o operador executar a partida do conjunto gerador de 10 MVA, ao interagir com essa tela o operador estará enviando para o CLP os comandos para executar cada etapa da partida e o CLP irá comparar também as pré-condições de cada etapa para poder então executá-la. Na IHM do painel aparece um ícone quando falta

alguma pré-condição para executar alguma etapa que ao ser clicado abre um *pop up* com as pré-condições indicando quais estão satisfeitas.

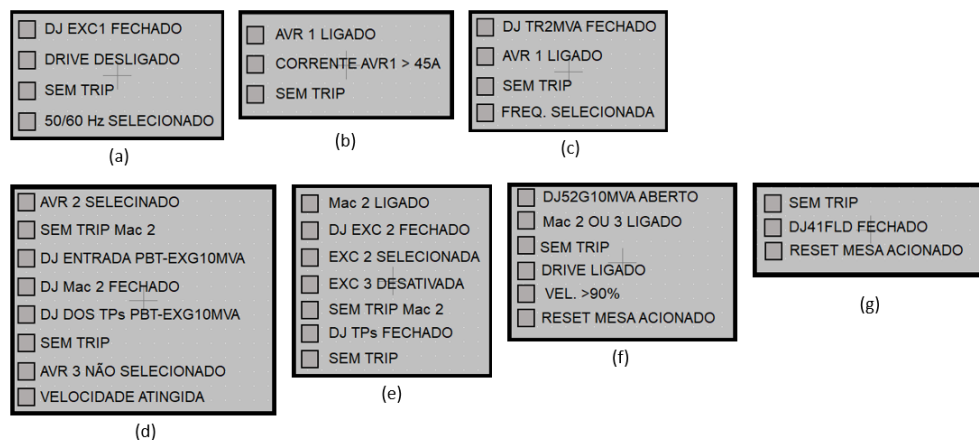
Figura 22 - Sequencia de partida



Fonte: Próprio autor.

A forma como as pré-condições aparecem são exibidas na 23, sendo (a) da excitação do motor CC de 1800kW, (b) do transformador de 2 MVA, (c) do Drive, (d) do motor ac de 66kW, (e) do gerador CC de 49 kW, (f) do contator de campo do gerador de 10MVA (DJ41G10MVA) e (g) do disjuntor de saída do gerador de 10MAV

Figura 23 - Pré-condições da sequência de partida



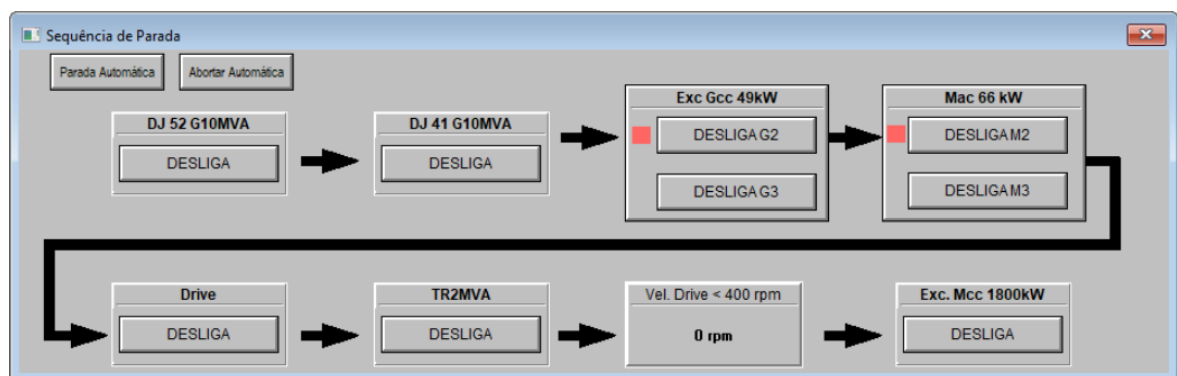
Fonte: Próprio autor.

Quando o sistema está com o conjunto 2 de motor cc de 66kW e gerador cc de 49 kW selecionado, conforme indicado pelos quadrados vermelhos na Figura 22, as pré-condições que aparecem são as da Figura 23, porém caso esteja selecionado o conjunto 3 ficam invertidas as informações correspondendo ao grupo selecionado.

Na sequência de partida temos também a opção de realizar a partida automática, que faz com que os comandos sejam feitos com temporizações pelo próprio CLP e mantendo as comparações com os permissivos em cada etapa. Os tempos da partida automática foram determinados com base na operação do sistema após os testes iniciais com a partida manual.

O processo de parada é análogo ao de partida. Obedecendo a ordem apresentada na Figura 24.

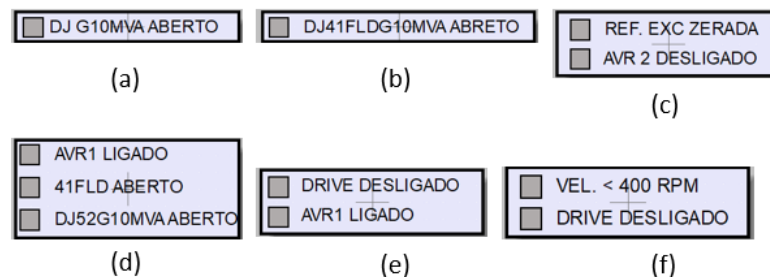
Figura 24 - Sequência de parada



Fonte: Próprio autor.

E possuindo também as pré-condições que são exibidas na Figura 25, sendo (a) da contatora de campo, (b) do gerador cc de 49 kW, (c) do motor ac de 66kW, (d) do Drive, (e) do TR2MVA e (f) da excitação do motor cc de 1800 kW.

Figura 25 - Pré-condições da sequência de parada



Fonte: Próprio autor.

3.1.3 Tela de medições

A tela de medições, que pode ser aberta a partir do click no botão “Tela de Medições”, apresenta todas as leituras de medições das grandezas elétricas do transformador de 2MVA, do Motor CC 1800kW, do Gerador de 10MVA e das temperaturas dos mancais e dos enrolamentos do transformador de 2MVA, do Motor CC 1800 kW e do Gerador de 10MVA como pode ser vista na Figura 26. Nesta tela estão indicados os valores de alarme (indicado em azul) e trip (Indicado em vermelho) para as temperaturas e para o valor de resistência ôhmica do rotor do gerador de 10MVA. Caso a resistência do rotor esteja abaixo do valor de trip ainda é possível ligar o Motor CC 1800 kW porém não será possível excitar o gerador.

Figura 26 - Tela de Medições

MEDIÇÕES GRANDEZAS ELÉTRICAS											
TR2MVA			Mcc 1800kW			G10MVA					
U_R	0 V	I_R	0 A	U_{arm}	0 V	U_{exc}	0 V	Lado Carga		Lado Neutro	Terra
U_S	0 V	I_S	0 A	I_{arm}	0 A	I_{exc}	0 A	I_R	0 A	I_S	0 A
U_T	0 V	I_T	0 A					I_T	0 A		
S	0 kVA	FP	0,00	Rotação		0 rpm		U_{exc}	0,0 V	S	0 kVA
P	0 kW	Q	0 kVA					I_{exc}	0,0 A	P	0 kW
								Q	0 kVA	FP	0,00
										64R	0 kOhm
											60 kOhm Alarme
											20 kOhm Trip
										Freq.	0,00 Hz
MEDIÇÕES TEMPERATURAS											
TR2MVA			Mancais			Mcc 1800kW			G10MVA		
Fase R	Fase S	Fase T	Mcc 1800kW LNA	0,0°C		Temperatura 1	0,0°C		Fase R	Fase S	Fase T
0,0°C	0,0°C	0,0°C	Mcc 1800kW LA	0,0°C		Temperatura 2	0,0°C		R ₁	S ₁	T ₁
			G10MVA LNA	0,0°C		Temperatura 3	0,0°C		R ₂	S ₂	T ₂
			G10MVA LA	0,0°C		Temperatura 4	0,0°C				
Alarme 90°C Trip 120°C			Alarme 55°C Trip 90°C			Alarme 90°C Trip 120°C			Alarme 90°C Trip 120°C		

Fonte: Próprio autor.

Nessa tela os principais objetos são os indicadores de informações analógicas, que estão relacionados a uma variável do CLP que está em um endereço específico. Essa informação pode estar chegando no CLP de duas formas, via comunicação, como é o caso das informações lidas diretamente pelos reles de proteção e enviadas via rede, ou o sinal pode estar conectado em uma entrada analógica, após passar por um transdutor, nesse caso deve ser feito uma conversão para que o valor da variável represente a grandeza elétrica que se deseja medir. Esse último processo

ocorre da seguinte forma, a entrada analógica está configurada para converter um sinal de 4 à 20 mA em um número em uma escala de 0 a 27648 no programa do CLP, por isso é preciso ter um transdutor que converta a grandeza elétrica que se deseja ler em um sinal de 4 à 20 mA e no programa inserir as relações correspondentes às escalas envolvidas no processo para que a variável que representa a leitura tenha o valor numérico da grandeza real.

3.1.4 Tela de eventos

A tela de eventos é um pop-up que pode ser aberto ao clicar no botão “Tela de Eventos” e que apresenta um registro de todos os eventos (alarmes, trips e acionamentos dos botões de emergência) com o respectivo horário de acontecimento.

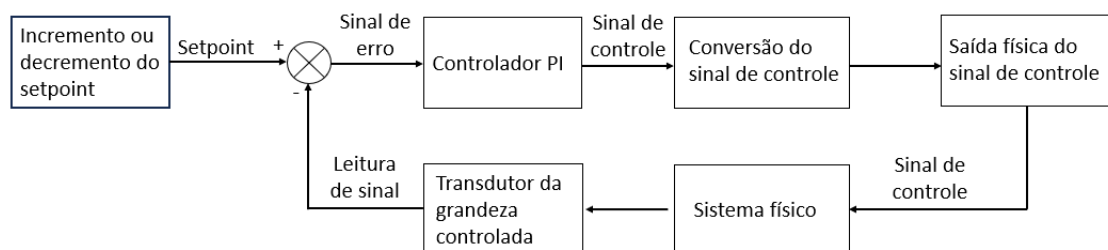
3.2 Controle

Os valores da corrente de excitação do motor CC de 1800kW e a excitação dos geradores de 49kW que faziam a excitação do G10MVA são determinados no painel de controle e automação. O controle destes valores é feito pelo algoritmo do CLP.

3.2.1 Controle da corrente de excitação do motor CC de 1800kW (FCR 1)

Apesar de ser nomeado como FCR1 tanto na lógica de programação e no diagrama funcional a atuação dessa parte do sistema não é a de um *automatic voltage regulator* (*regulador automático de tensão*). Na verdade, seu funcionamento é como um regulador de corrente de campo do inglês *field current regulator* (FCR), isso é: esse controle tem como realimentação o próprio valor da leitura da corrente de campo para mantê-la constante. O diagrama da Figura 27 apresenta a estrutura de controle aplicada.

Figura 27 - Diagrama de controle



Fonte: Próprio autor.

A primeira linha do diagrama de controle apresenta a estrutura que está na programação do CLP (no *software* Automation Builder). A primeira parte é o bloco de incremento e

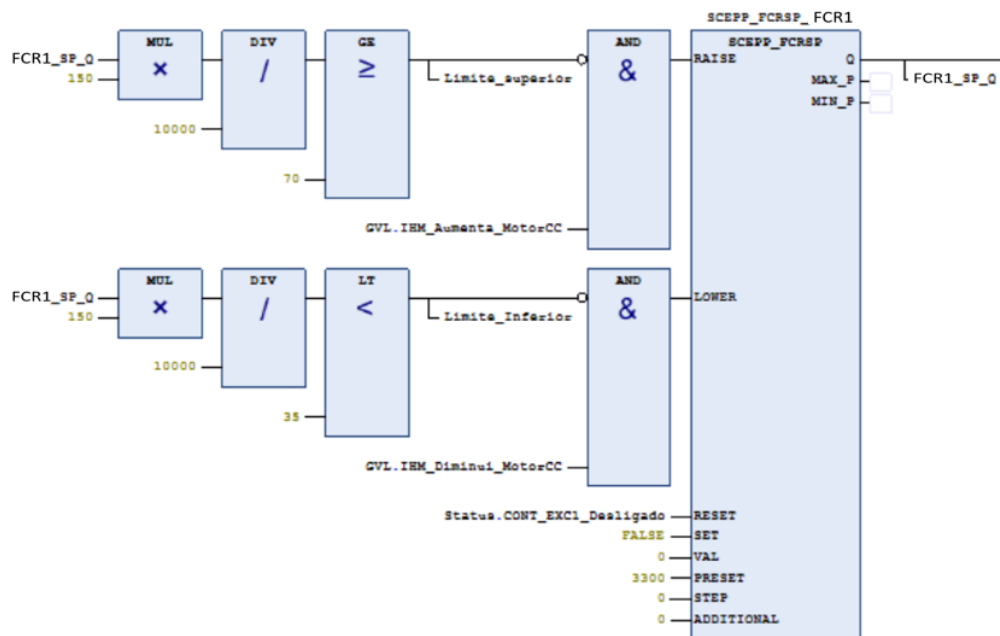
decremento que é feito em um bloco de função chamado SCEPP_FCRSP, que é uma função desenvolvida pela empresa SCEPP justamente para determinar um *setpoint* de FCR.

As entradas RASIE e LOWER servem para dar comandos de incremento e decremento do ajuste respectivamente. A saída desse bloco é um valor analógico entre 0 e 10000, essa faixa foi pensada para funcionar como um valor em porcentagem, como não seria viável usar variáveis tipo *float* nessa parte do programa essa faixa de valores é para que possam ser utilizadas duas casas decimais em um valor de porcentagem.

Quando a entrada RESET é verdadeira ela faz com que a saída do bloco assuma o valor zero. De forma semelhante se a entrada SET for verdadeira a saída assume o valor determinado na entrada VAL. O PRESET é um ajuste do valor inicial do *setpoint* (nesta aplicação o valor do PRESET é de 3300, que corresponde à uma corrente de 50A) e as entradas STEP e ADDITIONAL podem ser utilizadas para mudar a taxa de variação do bloco deixando o incremento e decremento mais sensíveis.

Na Figura 28 pode-se observar essa parte do programa:

Figura 28 - Incremento e decremento do *setpoint* da excitação do Motor CC

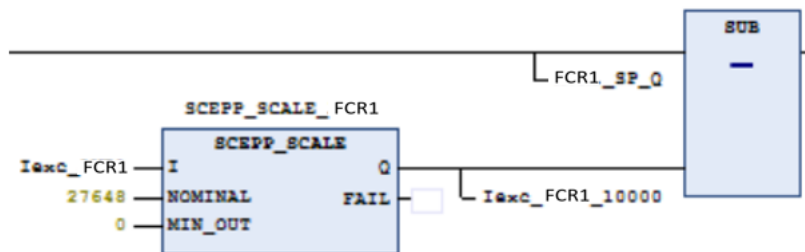


Fonte: Próprio autor.

Os blocos AND anteriores às entradas RAISE e LOWER servem para criar a relação com a condição de que não foi alcançado o limite superior ou inferior. A saída do bloco de *setpoint* (FCR 1_SP_Q) é multiplicada por 150 e dividida por 10000 escalonando-o para que pudesse ser comparado com o valor de limite de corrente superior (70A) e inferior (35A). Ressaltando que a corrente excitação do Motor CC tem um limite inferior pois caso a excitação chegue em valores muito baixos é perigoso ocorrer o disparo do motor.

Na Figura 29, pode ser observado o bloco de subtração (SUB) que subtrai do *setpoint* o valor de leitura de corrente do FCR 1, após este passar por um bloco de escalonamento convertendo-o para a mesma escala do *setpoint*, possibilitando a comparação entre eles

Figura 29 - Sinal de erro da excitação do Motor CC

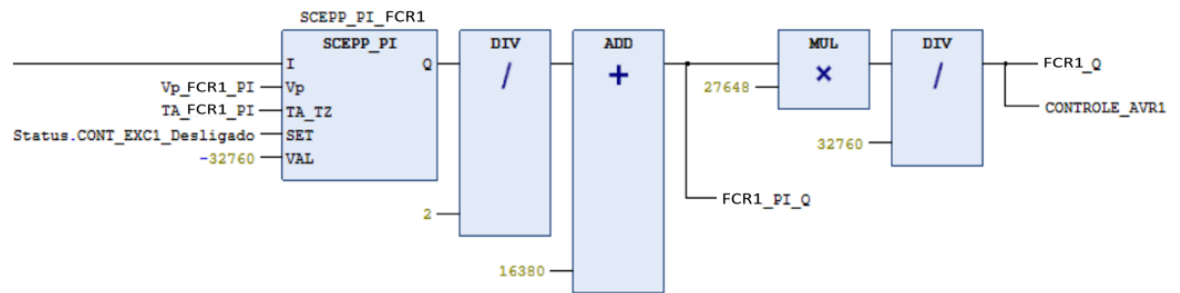


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 30, estão expostos os blocos de controle e escalonamento do sinal de controle, essa conversão é necessária pois a saída do bloco de controle PI está em uma faixa de -32760 a 32760 e passa para uma range de 0 a 27648, que é a escala da saída analógica do CLP, pela configuração da saída do CLP isso é transformado em um sinal de 4 a 20mA que é enviado para um circuito retificador trifásico controlado pelo ângulo de disparo dos tiristores.

As entradas SET e VAL do bloco SCEPP_PI servem para fazer com que a saída do sinal de controle seja -32760 quando o contator de saída da corrente de excitação estiver aberto (entrada Status.CONT_EXC1_Desligado). O valor -32760 é valor mínimo da escala do bloco de controle, sendo equivalente a zerar o sinal de controle.

Figura 30 - Sinal de controle da excitação do Motor CC



Fonte: Próprio autor.

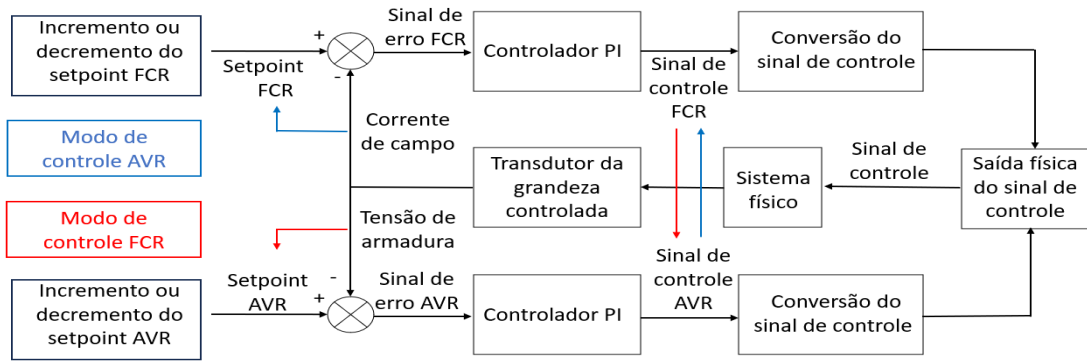
A saída da ponte retificadora controlada está conectada ao campo do motor CC de 1800kW e a leitura da sua corrente é feita por meio de um resistor shunt conectado ao transdutor já mencionado.

3.2.2 Controle da excitação do G10MVA

A excitação do G10MVA é feita pela saída de um dos geradores de 49kW e a excitação destes geradores é feita pelos circuitos Choopers, como o apenas um deles estará em funcionamento por vez e o funcionamento de ambos devem ser idênticos a programação do controle é feita em uma única lógica e a saída física é direcionada ao canal conectado no circuito selecionado.

O controle de excitação do gerador de 10MVA possui dois modos de operação o modo FCR e AVR, para que o sistema possa ser comutado entre os dois modos de operação, mesmo ligado, o valor do sinal de controle do modo inoperante recebe o valor do modo operante e o setpoint do modo inoperante recebe o valor de leitura da grandeza com a qual é comparado de forma que ao trocar o modo de operação o erro vai ser zero e não ocorrerá variação da corrente de campo. Isso está representado com as cores azul e vermelho no digrama da Figura 31.

Figura 31 - Diagrama do Controle de Excitação do G10MVA

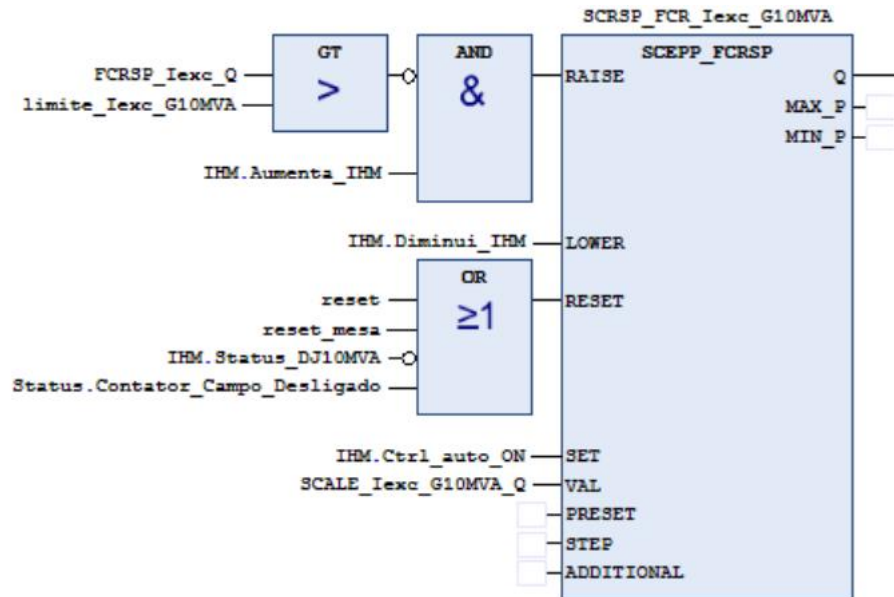


Fonte: Próprio autor.

O restante da operação do controle da excitação do G10MVA é igual tanto para o modo FCR como para o modo AVR, assim para simplificar será exposto apenas como foi feita a lógica de programação do modo FCR.

De forma similar ao controle do FCR 1 foi utilizado o bloco SCEPP_FCRSP, porém nesse caso não existe um limite inferior para o *setpoint* da excitação e esse também não tem um PRESET, iniciando do valor zero, conforme mostrado na Figura 32. Outra diferença é que nesse caso existem algumas entradas que fazem o RESET, que são os comandos de reset ou as condições de contator de campo desligado ou de disjuntor de saída do gerador desligado. Essas duas últimas condições garantem que a excitação do gerador será suave e que o disjuntor de saída do gerador será fechado com o valor mínimo de corrente circulando, apenas o valor causado pela corrente remanente. E ainda é possível ver que as entradas SET e VAL estão sendo utilizadas para fazer o *setpoint* do modo FCR receber o valor da leitura de corrente de excitação quando o sistema estiver no modo automático (AVR).

Figura 32 – Ponto de ajuste da excitação do G10MVA no modo FCR



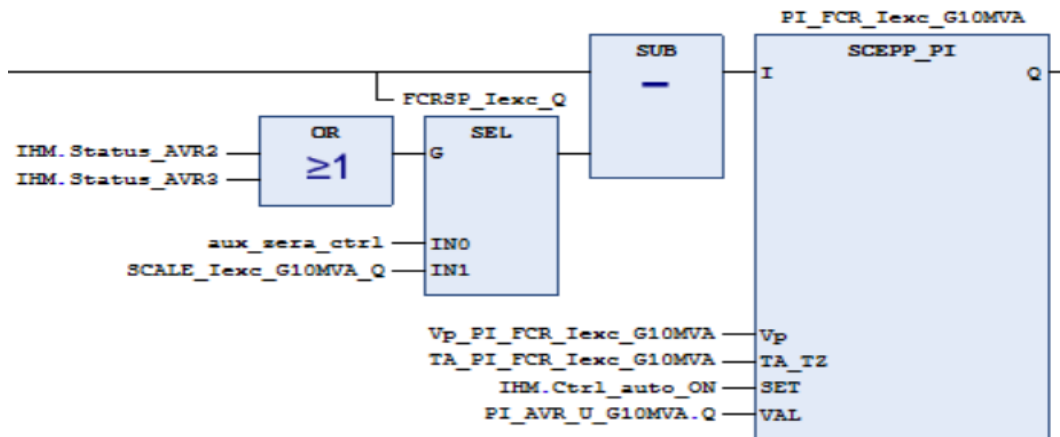
Fonte: Próprio autor.

O sinal de erro é gerado ao subtrair a leitura da corrente de excitação do valor de *setpoint* de corrente após a leitura de corrente passar por um conversor de escala para que seu valor possa ser comparado com o *setpoint*. A variável SCALE_Iexc_G10MVA_Q é a saída (o Q no final do seu nome indica que essa variável é a saída de um bloco) do bloco SCALE que está escalonando o valor da corrente de excitação do G10MVA (Iexc_G10MVA). Porém nesse caso não pode ser feita a subtração de forma direta. O bloco SEL faz com que a sua saída seja igual ao valor de IN0 se a entrada G for falsa ou de IN1 se a entrada G for verdadeira. Assim se o status algum dos sistemas de excitação (AVR2 ou AVR3) for verdadeiro, indicando que o sistema está excitando a comparação é feita entre o *setpoint* e a leitura da grandeza controlada. Caso AVR2 e AVR3 estejam desligados a comparação será entre o *setpoint* e um valor auxiliar para fazer com que o sinal de erro vá para zero.

Foi necessário fazer isso pois ao desligar a excitação sem zerar o *setpoint* previamente tanto o bloco o *setpoint* como a leitura de corrente iriam para zero fazendo com que o sinal de erro fosse também zerado, porém ao zerar o sinal de erro o bloco de controle faz com que o sinal de controle fique constante no valor que estava antes de desligar a excitação, de forma que ao religar a excitação teria um pico de corrente pois o sinal de controle estaria com um valor que não deveria. Adicionalmente nesse caso não puderam ser utilizadas as entradas de SET e VAL para zerar o sinal de controle como foi feito no caso da excitação do Motor CC pois essas

entradas estão sendo utilizadas para fazer com que o sinal de controle no modo FCR seja igual ao valor do sinal de controle do modo AVR quando estiver operando no modo AVR, como pode ser visto na Figura 33.

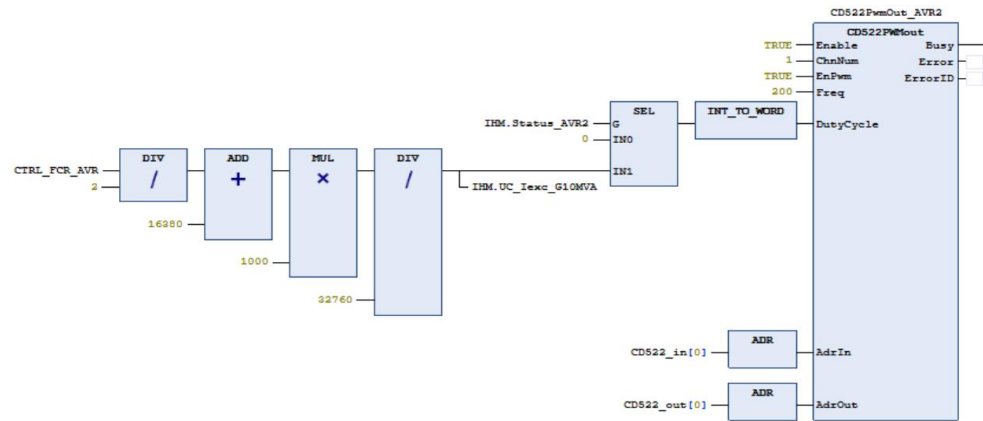
Figura 33 - Sinal de erro e bloco de controle PI da excitação do G10MVA modo FCR



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 34, está apresentada a lógica que converte a escala do sinal de controle que sai do bloco `SCEPP_PI` para uma faixa de 0 a 1000, correspondendo à faixa do *Duty Cycle* (essa faixa de 0 à 1000 corresponde à escala de porcentagem com uma casa decimal) do sinal PWM utilizado no circuito Chopper da excitação dos geradores de 49kW. Existem dois canais no cartão CD522 do CLP que são saídas de alta frequência que são utilizadas como saídas dos sinais PWM. A saída física referente do sinal PWM é configurada no bloco `CD522PWMout`, na entrada `AdrOut`, assim o bloco **SEL** faz com que quando o AVR2 estiver sendo utilizado o sinal de controle vai para o bloco `CD522PWMout` e quando não estiver sendo utilizado o AVR2 o bloco recebe o valor zero. Analogamente a mesma coisa acontece com o AVR3 e o bloco configurado para enviar o sinal PWM para a saída física referente a ele.

Figura 34 - Conversão do sinal de controle e seleção entre as saídas dos AVRs 2 e 3



Fonte: Próprio autor.

Os testes realizados no sistema são apresentados no próximo capítulo.

4 Ensaios Experimentais

Após toda a desmontagem dos painéis antigos, reestruturação da infraestrutura e posicionamento dos novos painéis foram feitas as conexões dos cabos de potência e comandos.

Na sequência iniciaram-se os testes, primeiramente com o teste a frio

4.1 Teste a frio

Os testes a frio realizados foram o teste de ponto a ponto das interligações do Painel de Automação e Controle (PAC) e demais painéis do sistema, o teste de ponto a ponto com os demais equipamentos como motores, quadros, campo gerador, drive DCS1800, mesa de comandos, etc.

Prosseguindo foram realizados os testes a quente com a máquina parada.

4.2 Teste a quente com G10MVA parado

Nessa etapa foram energizados os painéis, suas fontes internas, os circuitos auxiliares como iluminação, exaustores e calefatores. Na sequência foram verificados os comandos entre o PAC e os demais painéis e cubículos, assim como o funcionamento dos botões de emergência e foram conferidas as leituras e grandezas entre o PAC e os demais sistemas.

Seguindo, foi feita a energização e o teste do motor acoplado as excitatrizes DC, dos sistemas de excitação 1, 2 e 3 e a energização do circuito de média tensão, alimentando o transformador de entrada TR2MVA.

Finalmente foram realizados os testes a quente com a máquina girando.

4.3 Teste a quente com G10MVA girando

Por uma questão de segurança os primeiros testes com a máquina girando foram os de proteção.

4.3.1 Proteções

Os testes das proteções foram realizados com o cliente para demonstrar a atuação do sistema no caso de alguma atuação da proteção. Por ser um conjunto para fornecer energia para testes de transformadores existem atuações que apenas abrem o disjuntor de saída do gerador e atuações que desligam todo o sistema. Os testes das proteções foram feitos da seguinte forma, foi forçada a situação de TRIP, diminuindo o valor de atuação, referente a cada proteção e observada a resposta do sistema.

No Quadro 2, as funções que apresentam a letra “T” indicam que é um *Trip* e as que apresentam a letra “A” são apenas um alarme que será indicado nas telas da IHM e Supervisório.

Quadro 2 - Verificação das funções de proteção G10MVA

FUNÇÃO ANSI	SAÍDA DE TRIP			VERIFICAÇÃO
	Geral	DJ de Saída	ALARME	
50-T	X			Aprovado
51-A			X	Aprovado
51-T-1	X			Aprovado
51-T-2	X			Aprovado
59 FASE-A			X	Aprovado
59 LINHA-A			X	Aprovado
59 FASE-T		X		Aprovado
59 LINHA-T		X		Aprovado
46-A			X	Aprovado
46-T		X		Aprovado
64F - Z1 - A			X	Aprovado
64F - Z2 - T		X		Aprovado
50G-A			X	Aprovado
50G-T	X			Aprovado
87-T	X			Aprovado
CORTINA DE LUZ-T	X			Aprovado
PORTA DO POSTO-T	X			Aprovado
PORTABANCO CAPACITOR-T	X			Aprovado
SOBREVELOCIDADE - A			X	Aprovado
SOBREVELOCIDADE - T	X			Aprovado

Fonte: Próprio autor.

As funções de sobre corrente, de proteção diferencial e sobre velocidade são responsáveis pelo desligamento total do sistema, além dessas existem mecanismos de proteção humana que ficam na porta do posto de medição, na porta do banco de capacitores e a cortina de luz (posicionada para fechar o perímetro do transformador testado) que também desligam todo o sistema. As funções de sobre tensão, desbalanço de corrente e isolação do rotor abrem o disjuntor de saída do gerador.

Após os testes das proteções foram realizados os demais testes do comissionamento sendo esses apresentados como resultados deste trabalho.

5 Resultados

Foram realizados testes a vazio, de curto trifásico e curto bifásico. Com esses testes é possível comparar a resposta do sistema com as curvas características do gerador síncrono, além disso, os valores registrados servirão como base para a equipe de manutenção avaliar alguma variação ou anomalia do conjunto gerador.

5.1 Teste a vazio

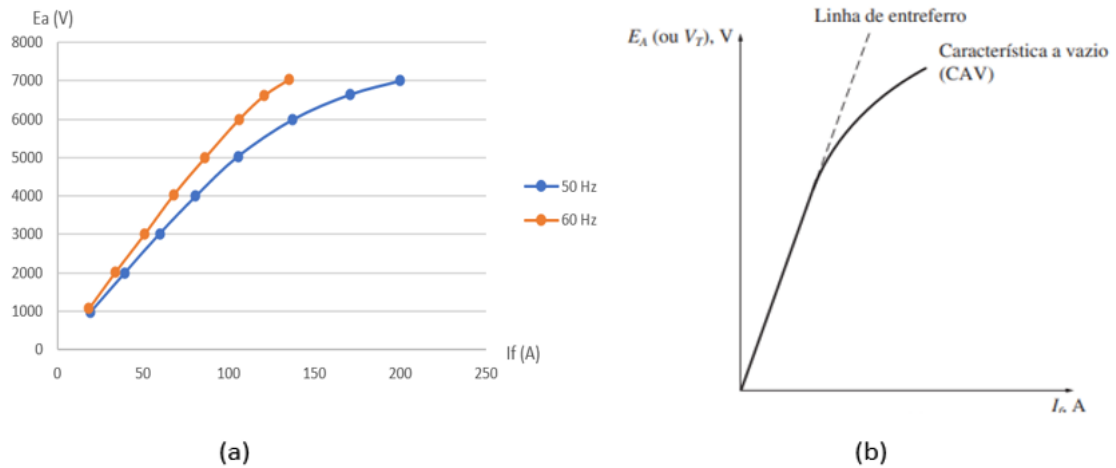
Conforme indicado na revisão bibliográfica, o teste a vazio é feito com os terminais de saída do gerador desconectados e elevando gradualmente a corrente de excitação. Os valores registrados no teste a vazio em 50Hz e 60Hz estão expostos nas Tabela 3. No teste a vazio espera-se observar uma região linear entre a relação de corrente de campo e tensão e uma região de saturação, por isso foram plotados os gráficos de tensão versus corrente de campo dos testes em 50Hz e 60Hz e comparados com a curva característica a vazio que estão expostos na Figura 35.

Tabela 1 - Teste a vazio G10MVA

50 Hz		60 Hz	
If (A)	Ea(V)	If (A)	Ea(V)
19,5	980	18,5	1070
39,4	2000	33,8	2010
59,7	3020	50,8	3000
80,6	3990	68	4040
105,3	5030	86	4990
137,3	5990	106,1	6000
170,6	6640	120,8	6620
200	7000	134,9	7030

Fonte: Próprio autor.

Figura 35 - Ensaio a vazio



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 35 (a) está o gráfico das leituras coletadas nos ensaios a vazio em 50Hz e 60 Hz e na (b) está a característica a vazio.

A tensão nominal do gerador de 10MVA é de 6600V, porém foram coletadas medições até os 7000V para evidenciar a característica a vazio do gerador.

Com o enrolamento de armadura da máquina em circuito aberto, a tensão de terminal é igual à tensão gerada. Assim, a característica a vazio é também uma medida da relação entre a corrente de campo, podendo assim fornecer uma medida direta da indutância mútua entre o campo e a armadura.

O entreferro tem a relutância dominante no caminho de fluxo da máquina, de forma que a saturação causa o afastamento do comportamento da tensão na armadura com relação à linha de entreferro.

Como de acordo com a equação 2, a tensão E_a é diretamente proporcional à velocidade angular, é necessária uma corrente menor para atingir o mesmo nível de tensão na armadura com o gerador girando à 60 Hz. Como é possível ver na Figura 35.

Como a reatância síncrona é proporcional à frequência, por isso, para uma frequência maior é mais difícil o fluxo de corrente no estator o que reduz o fluxo magnético induzido para uma mesma corrente de campo. Isso pode ser observado na Figura 35, na qual um mesmo valor de tensão é atingido com uma corrente de excitação menor na curva de menor frequência (50Hz).

5.2 Teste de curto circuito

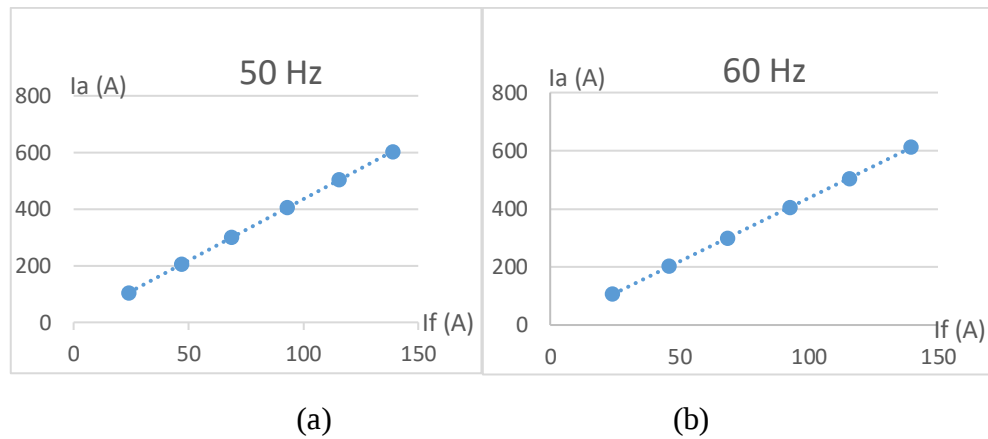
Em seguida foram realizados os testes de curto circuito no gerador. Os valores registrados nos testes em 50 Hz e 60 Hz estão apresentados nas Tabelas 4. Conforme visto na revisão bibliográfica a relação entre as correntes de campo e armadura são proporcionais no ensaio de curto-circuito, na Figura 36 estão apresentados os gráficos de corrente de armadura (I_a) versus corrente de campo (I_f) nos quais é possível observar essa linearidade.

Tabela 2 - Teste de Curto Circuito G10MVA

50Hz		60 Hz	
I_f (A)	I_a (A)	I_f (A)	I_a (A)
24	104	24,4	107
47	206	46,2	202
69	300	68,8	300
92,9	406	92,8	406
115,6	503	116,1	505
139,2	604	139,6	612

Fonte: Próprio autor.

Figura 36 - Teste de Curto Circuito



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 36 (a) está o gráfico de corrente de armadura versus correntes de campo no ensaio em 50Hz e na (b) está o gráfico do ensaio em 60 Hz.

5.3 Teste de curto circuito bifásico

Como o sistema também é utilizado para alimentar testes monofásicos, nos quais são curto circuitadas duas fases, foi realizado o teste de curto circuito bifásico para coletar as leituras dos valores de corrente e tensão. Para realizar esse teste é necessário desabilitar a proteção de desbalanço (ANSI 46).

O levantamento dessas leituras tem como principal objetivo servir como base para o time de manutenção avaliar alguma alteração ou anomalia do sistema. Os valores obtidos estão expostos nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 3 - Teste de curto circuito bifásico 50Hz

MCC 1800kW		G10MVA em 50Hz							
I exc	I arm	U excitação	I excitação	U RS	U ST	U TR	I R	I S	I T
49,8	166	5,6	15,2	240	40	250	97	97	0
49,8	164	10,1	33,2	530	80	540	215	214	0
49,8	238	13,8	48,3	750	110	750	306	307	0
50	312	18	63,8	1000	150	1010	418	416	0
49,7	400	21,4	79	1200	180	1210	502	502	0

49,7	494	26,1	94,1	1430	220	1440	606	603	0
------	-----	------	------	------	-----	------	-----	-----	---

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 - Teste de curto circuito bifásico 60Hz

MCC 1800kW		G10MVA em 60Hz							
I exc	I arm	U excitação	I excitação	U RS	U ST	U TR	I R	I S	I T
50	128	5,4	17,2	220	30	220	101	101	0
49,9	160	10,2	29,9	430	60	430	205	205	0
49,9	214	11,6	48,5	640	100	640	310	309	0
50,1	268	18,5	66,7	820	120	820	403	402	0
49,9	346	24,9	82,9	1030	160	1040	510	509	0
49,8	434	24,8	92,5	1210	605	1220	605	603	0

Fonte: Próprio autor.

6 Conclusão

Por falta de um transformador finalizado para realizar testes com carga foram encerrados os testes sem esta etapa. Os testes executados foram suficientes para finalizar o comissionamento, possibilitando observar que as medições das grandezas elétricas apresentaram valores e comportamentos condizentes com o esperado. Esses levantamentos também foram importantes para criar um registro dos valores de referência para a equipe de manutenção. Além dos levantamentos, os testes das proteções também foram satisfatórios de forma que o sistema ficou flexível para realização dos testes ao mesmo tempo que garante a segurança e durabilidade dos equipamentos.

Este trabalho apresentou abrangência significativa por integrar programação lógica, controle, eletrônica de potência, circuitos elétricos e máquinas elétricas em um mesmo projeto aplicado ao comissionamento de um grupo gerador de 10 MVA. Essa integração multidisciplinar reforça a relevância prática e acadêmica do estudo, extrapolando a aplicação restrita ao sistema de excitação.

A parte de lógica de programação foi a base para desenvolver o programa principalmente da parte operacional do sistema, vinculando a IHM e o supervisor ao CLP. O controle ficou mais limitado aos blocos já existentes, porém com os conhecimentos relacionados à essa área foi possível ter um bom entendimento do funcionamento desses blocos. A eletrônica de potência foi aplicada no circuito retificador controlado com ponte a tiristores, cujo sinal de controle atua sobre o ângulo de disparo dos tiristores. Muito dos conhecimentos de máquinas elétricas foi exigido também por trabalhar com diversas máquinas, motores CC, motores de indução e geradores síncronos

Outro fator importante foi o tempo disponível para o desenvolvimento deste projeto. O período foi de aproximadamente um ano entre o final da montagem e o comissionamento, de forma que foi possível aprender a utilizar as ferramentas para programação do CLP, para desenhar a IHM e o supervisor, desenvolver os programas, testar o sistema. Houve bastante tempo para entender como o sistema todo deveria funcionar, tanto no sentido amplo como o funcionamento de cada parte dos painéis, cada comando, transdutor e atuador. Com visitas no cliente foram identificadas demandas que acarretaram mudanças e ajustes no decorrer do desenvolvimento.

E por fim a experiência de supervisionar a desmontagem dos painéis antigos as alterações para acomodar os novos painéis, a instalação e conexão dos mesmos para então testar e comissionar o Grupo G10MVA foram processos enriquecedores para a minha formação

7 Bibliografia

Bolton, W. *Programmable Logic Controllers*. Elsevier (2006).

Chapman, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. AMGH editora LTDA (2013).

Dudarte, A. C. *INTRODUÇÃO À PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EQUIPAMENTOS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO*. São Paulo: Artliber.(2018)

Fuentes, R. C. Apostila de Automação Industrial. Santa Maria, RS. (2005) Acesso em 03 de 2025, disponível em http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/CA05.pdf

Mamede, D. R. *PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA*. RIO DE JANEIRO: Livros Técnicos e Científicos.(2013)

Mardegan, C.. Proteção e seletividade. *O Setor Elétrico*. (Março de 2010)

Schweitzer Engineering Laboratorie. (2019). SEL-751 Feeder Protection Relay Instruction Manual.(2019)

Schweitzer Engineering Laboratories. SEL-700G Generator Protection Relay Instruction Manual.(2018)

Schweitzer Engineering Laboratories. SEL-849 Motor Management Relay Instruction Manual.(2017)

Umans, S. D. (2014). *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. Porto Alegre: AMGH EDITORA LTDA.(2014)

Vodovozov, V . *Introdution to Power Eletrônics*. bookboon.(2010)