

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Sistema de monitoramento e diagnóstico de
falhas em geradores com sistema de excitação
brushless

Mario Marcio Torres

Itajubá, 30 de julho de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Mario Marcio Torres

Sistema de monitoramento e diagnóstico de
falhas em geradores com sistema de excitação
brushless

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção
do Título de **Mestre em Ciências em Engenharia
Elétrica.**

Área de Concentração: **Sistemas Elétricos de Potência**

Orientador: **Prof. Dr. Angelo J. Junqueira Rezek**

30 de julho de 2018
Itajubá



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Título da Dissertação: **“Sistema de Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Geradores com Sistema de Excitação *Brushless*”**

Autor: **Mario Marcio Torres**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado	
1º	A	
2º	A	
3º	A	

Observações:

(1) O Trabalho será considerado Aprovado (A) se todos os Examinadores atribuírem conceito A.

(2) O Trabalho será considerado Reprovado (R) se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.

Este documento terá a validade de 30 (trinta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito final: A, ou seja, aprovado

Observações: _____

Itajubá, 30 de julho de 2018.

Prof. Dr. Délvio Franco Bernardes
1º Examinador – SD Soluções EngeHydro

Prof. Dr. José Carlos Grilo Rodrigues
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek
3º Examinador (Orientador) – UNIFEI

Mario Marcio Torres

Sistema de monitoramento e diagnóstico de falhas em geradores com sistema de excitação *brushless*/ Mario Marcio Torres. – Itajubá, 30 de julho de 2018-
113 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Angelo J. Junqueira Rezek

Dissertação (Mestrado)

Universidade Federal de Itajubá

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 30 de julho de 2018.

1. Sistema de excitação *brushless*. 2. monitoramento em tempo real. I. Orientador. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Faculdade de Engenharia Elétrica. IV. Título

CDU 07:181:009.3

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Dr. Angelo José Junqueira Rezek pela paciência, disponibilidade e preciosas recomendações durante o tempo que passamos juntos, que serviram para o meu desenvolvimento profissional, e por suas orientações na produção deste trabalho.

Gostaria de agradecer ao professor Dr. João Guilherme, Ex-Coordenador da Pós-graduação do departamento de Engenharia Elétrica da UNIFEI, pela confiança em mim depositada e ao atual coordenador Dr. Tales pelo mesmo resiliente e sincero apoio.

Sou muito agradecido também ao Dr. Délvio Franco Bernardes que foi o grande incentivador desta pesquisa, registro aqui minha sincera gratidão, e cujos conhecimentos acadêmicos e profissionais tem minha mais profunda admiração.

Agradeço ao presidente da EPASA, Sr. "Juca", e a todo seu corpo técnico e gerencial, por me receberem na usina e me suprirem de valiosas informações para realização desta pesquisa.

Agradeço ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel por promover projetos de pesquisas que fomentam a integração da Academia com os Agentes do setor elétrico, desenvolvendo seu maior patrimônio.

Agradeço a minha esposa e filhas, a nossas famílias e a todos que me incentivaram à realização desta empreitada fascinante de aprendizagem.

Agradeço acima de tudo ao Senhor Jesus Cristo, autor e consumidor da nossa fé e esperança, que tudo seja sempre para Sua magnificente glória.

*"Eu reconheço que tudo podes e que nenhum dos teus projetos fica sem realização."
(Bíblia Sagrada Pastoral - Livro de Jó: cap.42, vs.1º)*

Resumo

Os empreendimentos de geração termelétrica emergenciais sofreram uma alteração significativa no seu volume de despacho, dada às restrições hidrológicas e os atrasos na entrada em operação de novos empreendimentos de geração e transmissão. Este cenário demanda um ajuste significativo ao planejamento da manutenção dos geradores destas UTEs, de modo a garantir a disponibilidade e confiabilidade energética ao Sistema Interligado Nacional - SIN . Geradores com excitação *brushless* ou simplesmente geradores *brushless* como o próprio nome já indica, a alimentação do enrolamento de campo não se dá por meio de escovas de carvão. Estas escovas são substituídas por um sistema de excitação formado por um conjunto de três bobinas defasadas em 120 graus, girantes, acopladas ao eixo do gerador, juntamente com uma ponte de diodos, ou seja, a alimentação de corrente contínua ao campo se dá de forma indireta. Toda esta estrutura de acoplamentos magnéticos e elementos girantes dificultam a obtenção de informações relevantes do campo do gerador e a ausência deste monitoramento pode resultar na queima de polos, ou em curtos-circuitos entre os enrolamentos do rotor, provocando deficiências operacionais no atendimento das potências exigidas dos mesmos. Certas falhas ou condições operacionais indevidas no sistema de excitação de geradores *brushless*, tais como queima de diodos da ponte girante, sobre temperaturas nos enrolamentos de campo, etc., dificilmente são diagnosticadas em tempo hábil de intervir preventivamente. Esta pesquisa apresenta uma metodologia de monitoramento e diagnóstico não invasiva, de baixo custo de implementação, possibilitando identificar falhas num conjunto de elementos do sistema de excitação *brushless* . Trata-se, portanto, de uma metodologia de avaliação da integridade operacional de geradores *brushless* em fase de sincronização, bem como em fase de operação integrada. A metodologia foi concebida para ser aplicada numa planta termelétrica do SIN, previu ensaios operacionais num conjunto de cinco geradores *brushless* sendo quatro com potências nominais individuais de 10,954 MVA e o outro de 5,444 MVA. Dentro da metodologia foi desenvolvido um conjunto de regras e correlações de grandezas elétricas para através das mesmas, descobrir e segregar possíveis falhas operacionais. Tais regras ao serem implementadas numa plataforma computacional, acompanharão em tempo-real possíveis anormalidades internas em alguns componentes específicos dos geradores *brushless* sendo capaz de emitir alertas e subsidiar aos gestores da planta de informações relevantes para a tomada de decisão quanto a parada imediata ou programada da(s) unidade(s) geradora(s) sob suspeitas. Busca-se com esta metodologia de monitoramento e diagnóstico contribuir com a disponibilidade e confiabilidade das Unidades Geradoras e melhorar suas condições operacionais, garantindo a vida útil deste tipo de geradores.

Palavras-chaves: Sistema de excitação *brushless*, monitoramento em tempo real, usina termoelétrica, planejamento da manutenção de geradores

Abstract

The emergency thermoelectric generation projects suffered a significant change in their dispatch volume due to hydrological restrictions and delays in the start-up of new generation and transmission projects. This scenario demands a significant adjustment to the maintenance planning of the generators of these TPPs, in order to guarantee the availability and energy reliability of the National Interconnected System - NIS. Generators with brushless excitation, or simply brushless generators, do not have DC power directly injected into the coils that form their poles. In this type of generator what is used is a magnetic coupling feature by placing a set of three coils demarcated by 120 degrees, rotating, on the generator shaft, together with a bridge of diodes that will allow the control of the terminal voltage and the powers Developed by the generator. All this structure of magnetic couplings and rotating elements make it difficult to obtain relevant information from the field of the generator and the absence of this monitoring can result in the burning of poles, short circuits in the rotor windings and operational deficiencies in the power supply due to the burning of diodes on the bridge. These problems would hardly be diagnosed early enough to intervene preventively. This research presents a methodology of noninvasive monitoring and diagnosis, of low implementation cost, allowing to identify failures in a set of internal elements of generators with brushless excitation system. It is, therefore, a methodology for evaluating the operational integrity of brushless generators before synchronization to an electrical system, as well in operation. The methodology was designed to be applied in a real SIN plant, providing operational tests on a set of five brushless generators of a thermoelectric generation plant connected in the NIS (230kV), four with individual nominal powers of 10,954 MVA and the other of 5,444 MVA. Within the methodology was developed a set of rules and correlations of electric quantities of the brushless generator, and through them, to discover and segregate possible operational failures. These rules, when implemented in a computational platform, will monitor in real time the evolution of their magnitudes, diagnosing possible internal abnormalities in some specific components of the brushless generators, being able to issue alerts to the operation and maintenance managers of the plant about immediate stop or not of the generating unit. This methodology of monitoring and diagnosis contributes to guarantee the availability and reliability of the Generating Units and to improve the operational conditions, allowing the increase of the useful life of this type of generators.

Key-words: Brushless excitation system, real-time monitoring, thermoelectric power plant, generator maintenance planning

Lista de ilustrações

Figura 1 – Decaimento da Energia Armazenada no SIN no período 2012-2014	16
Figura 2 – Evolução do despacho de térmicas no SIN no período jan/2012 a fev/2015	17
Figura 3 – Curva da banheira - <i>Mean Time to Failure - MTTF</i>	18
Figura 4 – Localização exata da queima dos terminais dos pólos do rotor	19
Figura 5 – Manual 2012 do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Aneel	21
Figura 6 – Gerador síncrono <i>brushless</i> das usinas da EPASA	24
Figura 7 – Circuito equivalente do gerador síncrono de pólos salientes.	25
Figura 8 – Rotor de polos salientes de um gerador trifásico.	26
Figura 9 – Modelo da máquina primária da UTE EPASA	27
Figura 10 – Representação elétrica da excitatriz <i>brushless</i>	28
Figura 11 – Diagrama de blocos da excitatriz brushless.	29
Figura 12 – Componentes típicos do sistema de excitação	31
Figura 13 – Diagrama de blocos do sistema de regulação de tensão.	31
Figura 14 – Configuração do sistema geoeletrico das UTEs da EPASA.	32
Figura 15 – Diagrama de blocos do sistema de excitação.	34
Figura 16 – Diagrama de blocos do limitador de subexcitação.	34
Figura 17 – Diagrama de blocos do limitador volts x hertz.	34
Figura 18 – Diagrama de blocos do sistema de regulação de velocidades conforme o fabricante.	36
Figura 19 – Curva de capacidade dos geradores de 5,444 MVA da EPASA.	37
Figura 20 – Curva de capacidade dos geradores de 10,954 MVA da EPASA.	37
Figura 21 – Curva a vazio e de curto-circuito dos geradores de 5,444 MVA da EPASA.	38
Figura 22 – Curva a vazio e de curto-circuito dos geradores de 10,954 MVA da EPASA.	38
Figura 23 – Fichas de especificações técnicas dos geradores de 5,444 e 10,954 MVA da EPASA	39
Figura 24 – Curva de capacidade térmica dos geradores de 5,444 e 10,954 MVA da EPASA	40
Figura 25 – Gerador principal representado com sua excitatriz <i>brushless</i> independente	41
Figura 26 – Configuração da excitatriz C.A. <i>brushless</i>	42
Figura 27 – Representação do conjunto com as variáveis de controle	43
Figura 28 – Representação do conjunto com as variáveis de controle	43
Figura 29 – Lógica implementada para verificação de gerador em vazio	51
Figura 30 – Lógica de verificação de falha de magnetização em vazio	52
Figura 31 – Lógica de verificação de falha de sobretemperatura no campo da excitatriz	53

Figura 32 – Lógica de diagnóstico e alarme de temperatura eleva e temperatura crítica no campo da excitatriz	54
Figura 33 – Lógica de diagnóstico de falha de conexões no campo da excitatriz . . .	54
Figura 34 – Lógica de diagnóstico de falha de desvio de tensão entre as fases	55
Figura 35 – Simulação de acréscimo de corrente para compensar falhas na ponte retificadora rotativa <i>brushless</i>	57
Figura 36 – Curva linearizada V_t x I_{exc} do grupo gerador n ^o 29	58
Figura 37 – Protocolo de ensaios operacionais do grupo gerador n ^o 29	59
Figura 38 – Curva linearizada MVA x I_{exc} do grupo gerador n ^o 29	59
Figura 39 – Protocolo de ensaios operacionais do grupo gerador n ^o 30	60
Figura 40 – Curva linearizada MVA x I_{exc} do grupo gerador n ^o 30	60
Figura 41 – Protocolo de ensaios operacionais do grupo gerador n ^o 31	61
Figura 42 – Curva linearizada MVA x I_{exc} do grupo gerador n ^o 31	61
Figura 43 – Protocolo de ensaios operacionais do grupo gerador n ^o 32	62
Figura 44 – Curva linearizada MVA x I_{exc} do grupo gerador n ^o 32	62
Figura 45 – Protocolo de ensaios operacionais do grupo gerador n ^o 33	63
Figura 46 – Curva linearizada MVA x I_{exc} do grupo gerador n ^o 33	63
Figura 47 – IHM do gerador <i>brushless</i> número 29 com a máquina primária	64
Figura 48 – IHM com as grandezas monitoradas no projeto	64
Figura 49 – IHM de ajustes das constantes do projeto de pesquisa por grupo	65
Figura 50 – IHM de ajustes dos parâmetros das curvas para o cálculo de I_{exc} . . .	65
Figura 51 – Tela do lado de 13.8 kV dos geradores <i>brushless</i>	66
Figura 52 – Tela de acompanhamento de tendências e limite de alarmes	66
Figura 53 – Tela de lógica de detecção de falhas no processo de magnetização . . .	67

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros dos 40 geradores <i>brushless</i> das usinas.	33
Tabela 2 – Definição dos parâmetros do sistema de excitação	35
Tabela 3 – Ajustes do regulador de velocidade das unidades de 10,954 MVA	36
Tabela 4 – Ajustes do regulador de velocidade das unidades de 5,444 MVA	36
Tabela 5 – Descrição das variáveis de entrada	44
Tabela 6 – Variáveis calculadas a partir das variáveis de entrada	44
Tabela 7 – Variáveis dos cálculos iniciais	45
Tabela 8 – Ensaio da curva de saturação à vazio dos geradores	46
Tabela 9 – Levantamento da Curva Operacional com Gerador Sincronizado	48
Tabela 10 – Levantamento da resistência e temperatura do campo da excitatriz . .	49

Lista de abreviaturas e siglas

AC	<i>(Alternate Current)</i> ou Corrente Alternada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CMO	Custo Marginal de Operação
CVU	Custo Variável Unitário
DC	<i>(Direct Current)</i> ou Corrente Contínua
EPASA	Centrais Elétricas da Paraíba S.A.
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> ou Tempo Médio Entre Falhas
MTTF	<i>Mean Time To Failures</i> ou Tempo Médio Para Falhas
MVA	Megavolt Ampère
MVar	Megavolt ampère reativo
MWh	Megawatt-hora
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIE	Produtor Independente de Energia Elétrica
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> ou Controlador Lógico Programável
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
RAT	Regulador Automático de Tensão
UTE	Usina Termelétrica

Lista de símbolos

S	Potência Aparente do gerador em MVA
P	Potência Ativa Trifásica do gerador em MW
Q	Potência Reativa Trifásica do gerador em $Mvar$
V_t	Tensão Terminal do gerador lado de $13,8kV$, fase-fase em kV
I_s	Corrente de Armadura do gerador em A
cos	Fator de Potência Nominal
f_e	Frequência elétrica em Hz
p	Pares de polos
n_s	Velocidade síncrona do gerador em rpm
n_m	Velocidade mecânica do gerador em rpm
I_{exc}	Corrente excitação - excitatriz <i>brushless</i> em A
V_{exc}	Tensão de excitação - excitatriz <i>brushless</i> em V
R_{exc}	Resistência de excitação - excitatriz <i>brushless</i> em V
ϕ_{exc}	Fluxo magnético da excitatriz <i>brushless</i>
ϕ_r	Fluxo magnético do gerador
V_r	Tensão do rotor em V
I_r	Corrente do rotor em A
R_r	Resistência do rotor do gerador em Ω (<i>Ohms</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos	22
1.3	Estruturação	23
2	REVISÃO TEÓRICA	24
2.1	O gerador síncrono de corrente alternada - C.A.	24
2.2	O rotor do gerador síncrono de C.A.	26
2.3	A máquina primária ou turbina	27
2.4	A excitatriz brushless	28
2.5	O Regulador Automático de Tensão - RAT	31
3	A TERMELÉTRICA EM ESTUDO	32
3.1	Diagrama geoeletrico das usinas da EPASA	32
3.2	Dados técnicos dos geradores da termelétrica em estudo	33
3.3	Modelos e dados dos sistemas de controle da excitação	34
3.4	Definição dos parâmetros do sistema de excitação	35
3.5	Modelos e dados dos sistemas de controle de velocidades	36
3.6	Curvas de capacidade dos geradores brushless	37
3.7	Curvas a vazio e de curto-circuito dos geradores brushless	38
3.8	Especificações dos geradores brushless	39
3.9	Curva de capacidade térmica dos geradores brushless	40
4	A METODOLOGIA DE SOLUÇÃO	41
4.1	Análise preliminar à metodologia proposta	41
4.2	Desenvolvimento da metodologia e dos algoritmos de falhas	44
4.3	Levantamento da curva de saturação a vazio	46
4.4	Levantamento da curva operacional do gerador sincronizado	48
4.5	Levantamento da temperatura do campo da excitatriz	49
4.6	Equacionamento Matemático – Algoritmos de Programação	50
4.7	Modelagem para o mapeamento de falhas no Sistema de Excitação	51
4.8	Monitoramento da condição em vazio do gerador	51
4.9	Monitoramento de falha de magnetização do gerador	52
4.10	Monitoramento da temperatura do campo da excitatriz	53
4.11	Monitoramento de conexões no campo da excitatriz	54
4.12	Monitoramento de curto-circuito entre espiras dos polos da excitatriz	54

4.13	Monitoramento de desequilíbrio entre fases do gerador	55
4.14	Monitoramento de curto-circuito entre espiras nos polos do gerador	55
4.15	Monitoramento de falhas no gerador sincronizado	55
4.16	Monitoramento de falha na ponte retificadora rotativa	56
5	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	58
5.1	Telas desenvolvidas no projeto de pesquisa	64
5.1.1	Planta do gerador brushless acoplado à máquina primária	64
5.1.2	IHM com as grandezas monitoradas no projeto de pesquisa	64
5.1.3	ajuste das constantes do sistema	65
5.1.4	Setup das curvas para o cálculo de I_{exc}	65
5.1.5	Tela das interligações em 13.8 kV dos geradores <i>brushless</i>	66
5.1.6	Tela de acompanhamento de tendência e limites de alarmes	66
5.1.7	Tela de lógica de detecção de falhas no processo de magnetização	67
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	68
	ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO	70
	ANEXO B – LÓGICA IMPLEMENTADA NO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	77
	REFERÊNCIAS	112

1 Introdução

Neste capítulo é exposta a motivação da pesquisa e seus objetivos, concluindo com a apresentação da estrutura do seu desenvolvimento.

1.1 Motivação

Os empreendimentos de geração termelétrica no Brasil, a partir do segundo semestre de 2013 sofreram uma alteração significativa no seu volume de despacho, dentre os muitos motivos podemos citar às restrições hidrológica, os atrasos na entrada em operação de novos empreendimentos de geração e transmissão e o baixo armazenamento dos reservatórios (1) conforme pode ser verificado na figura 1.

Figura 1 – Decaimento da Energia Armazenada no SIN no período 2012-2014



A operação centralizada do Sistema Elétrico Nacional - SIN é organizada nas seguintes premissas:

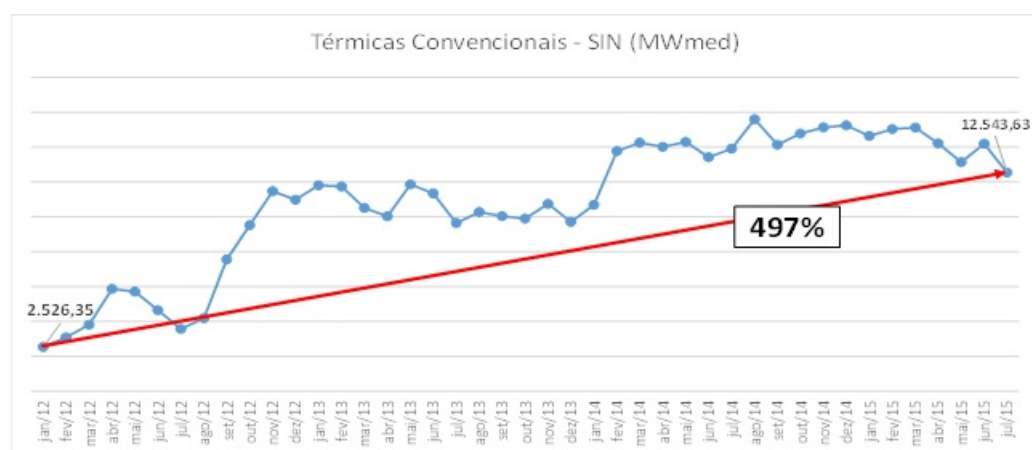
- interdependência operativa entre as usinas;
- interconexão dos sistemas elétricos;
- integração dos recursos de geração e transmissão para atender ao mercado de energia.

Para a otimização da integração das premissas apresentadas acima, no planejamento do despacho eletro-energético brasileiro, considera-se os resultados de modelos estocásticos em diferentes cenários, face aos desafios presentes na gestão da programação diária da operação do SIN, tais como: as restrições elétricas, energéticas, consequência das

indisponibilidades forçadas e programadas de unidades geradoras, linhas de transmissão, transformadores, dentre outros elementos relevantes. O objetivo é determinar um custo marginal de operação - CMO, associado a um determinado custo de *défit*. Na prática se busca reduzir os custos operativos bem como minimizar o uso de despacho de geração térmica de maior custo, com consequente redução de consumo de combustíveis (2).

Em períodos de condições hidrológicas desfavoráveis, como acentuadamente ocorreu no período de 2012 a 2014, e podem tornar a ocorrer no futuro, as usinas térmicas que em princípio deveriam ser despachadas na forma complementar para o atendimento ao mercado de energia, (como um seguro do suprimento energético), foram chamadas a operarem na sua capacidade máxima, durante vários meses, como pode ser verificado na figura 2.

Figura 2 – Evolução do despacho de térmicas no SIN no período jan/2012 a fev/2015



Este cenário alterou significativamente o número de usinas térmicas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, inserindo-as no *deck* de usinas despachadas na base para atendimento da demanda do Sistema Interligado Nacional – SIN. As usinas térmicas, mesmo aquelas cujo Custo Variável Unitário - CVU se encontrava acima de R\$ 800,00/MWh foram convocadas a despachar na sua potência máxima, durante as vinte e quatro horas do dia, por vários meses. Esta condição operacional demandou um ajuste significativo aos planos de manutenção destas UTEs, previstas na sua concepção para operar de forma emergencial, isto é, para atendimento da ponta de carga do Sistema Elétrico Brasileiro - SEB, o que demandaria uma operação anual na ordem de menos de 8% do tempo. Face a este novo cenário, estas usinas termelétricas foram despachadas em 100% do tempo na sua potência nominal. Certamente os programas de manutenção destas usinas, bem como seus custos foram bastante alterados daquilo que se havia planejado para outro cenário. Nesta condição, algo deveria ser feito do ponto de vista da gestão da manutenção destes ativos de geração, como a adoção de medidas preventivas envolvendo um monitoramento em tempo-real capaz de gerar curvas de

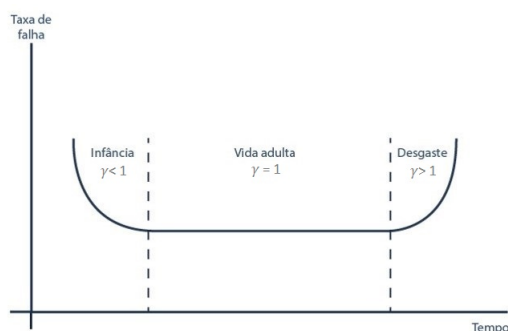
tendências e diagnóstico do estado operacional dos equipamentos, buscando assim melhorar e quando possível garantir sua integridade, disponibilidade e confiabilidade no pronto atendimento de exigências energéticas tanto na condição isolada quanto e principalmente integrada pelo ONS.

Qualquer equipamento de grande porte, composto por vários componentes mecânicos, eletroeletrônicos, painéis elétricos e sistemas auxiliares, construídos e constituídos de diferentes tipos de tecnologia e materiais, como é o caso das turbinas e dos geradores de energia elétrica, verifica-se ao longo da sua vida operacional que tais componentes sofrerão desgastes em maior ou menor grau, exigindo um controle rigoroso de manutenibilidade.

A norma brasileira NBR 5462 (1994) define o termo manutenibilidade como “a facilidade de um elemento em ser mantido ou recolocado no estado no qual pode executar as suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sobre condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”. Há que se considerar ainda, no caso dos geradores de energia, face aos fenômenos mecânicos e eletromagnéticos que operam nos seus enrolamentos, o agravamento de fadigas motivadas pelas abruptas variações de cargas do sistema, pelas paradas intempestivas, pelas vibrações mecânicas, pelos torques eletromecânicos, que de forma exponencialmente contribuem para a diminuição do tempo médio entre a ocorrência de falhas - MTBF, e até da sua vida útil.

Para atender as suas funções de conversão, controle de tensão (absorção e geração de reativos) e entrega de potência ativa, tais equipamentos sofrem diversos tipos de esforços de natureza mecânica e elétrica influenciadas pelos esforços torcionais, rotacionais, de variação de temperaturas, de vibrações, dentre outros. As fadigas podem ocorrer durante sua operação normal, em sobrecargas, nos momentos da entrada em operação, nas paradas forçadas, programadas e nas retomadas de carga. Um fato que deve ser considerado é a curva do tempo médio até a falha (Mean Time To Fail), também reconhecida como “Curva da Banheira”, a qual está representada na figura 3.

Figura 3 – Curva da banheira - *Mean Time to Failure - MTTF*

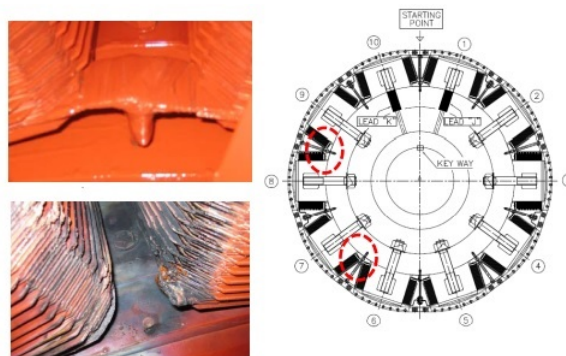


Na prática, esta curva indica a possibilidade da ocorrência ou uma maior possibilidade de falhas no início da vida operacional dos componentes ou da máquina elétrica ($\gamma > 1$), posteriormente surge uma temporada de estabilidade com raras ocorrências de falhas ($\gamma = 1$), para o encaminhamento do final da vida útil do equipamento estas possibilidades de falhas aumentam subitamente ($\gamma > 1$), exigindo avaliações econômicas bem estruturadas para a tomada de decisões de reparos ou substituições, (3).

Em algumas empresas, na gerência de manutenção preventiva, os reparos ou recondicionamentos da máquina são programados baseados nesta estatística, isto quer dizer que as tarefas de manutenção são baseadas no tempo gasto ou horas operacionais. No caso de uma usina, normalmente, ela começa a apresentar anomalias frequentes nos seus seis primeiros meses em operação, depois deste período as máquinas alcançam uma estabilidade, porém o numero de falhas aumenta novamente, fato este que implica na necessidade de substituição dos equipamentos, por conta da sua vida útil

A presente dissertação motivou-se no fato de que em 2012, em uma importante usina termelétrica do SIN, quatro geradores síncronos, do tipo *brushless* com potência de 10,95 MVA, 13,8 kV, 10 pólos, 60hz, 720 rpm e de pólos salientes sofreram sérias avarias mecânicas e elétricas cujas causas não foram detectadas. O Relatório Técnico das causas apresentou que devido à falta de dados monitorados, não foi possível identificar que tipo de forças inesperadas ocorreram durante o período de operação que levaram às avarias registradas, e que para a investigação em detalhes, atividades preventivas de monitoramento deveriam ser providenciadas. Na referida ocasião, ocorreram a queima das conexões inferiores dos pólos do rotor de quatro dos quarenta geradores submetidas a este regime de operação imposto à usina. A figura 4 reúne detalhes deste evento.

Figura 4 – Localização exata da queima dos terminais dos pólos do rotor



Todos os geradores apresentaram vários tipos de desgastes em seus componentes, as altas temperaturas no interior dos geradores em consequência das altas correntes requisitadas em seus enrolamentos pela falta de monitoramento das correntes de excitação também poderiam ser identificadas como causas primárias. A fim de se evitar danos materiais e humanos e até mesmo perdas permanentes de vários componentes dos geradores

de energia a presente pesquisa busca apresentar uma metodologia de monitoramento e diagnóstico de baixo custo econômico e de implantação, a qual permitirá aos responsáveis pela engenharia de operação e manutenção de usinas com geradores do tipo brushless monitorar e diagnosticar estes ativos de geração para que, em tempo hábil, recebam alertas para atuar assim que tais sistemas sinalizarem tendências à anormalidades, evitando assim a perda parcial ou permanente dos mesmos.

Importante destacar também que a presente dissertação é parte integrante de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D aprovado pela empresa Centrais Elétricas da Paraíba - EPASA, em conformidade regulatória ao objetivo do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia elétrica - Aneel, aqui na íntegra reproduzido "*O objetivo do Programa de P&D é alocar adequadamente recursos humanos e financeiros em projetos que demonstrem a originalidade, aplicabilidade, relevância e a viabilidade econômica de produtos e serviços, nos processos e usos finais de energia. Busca-se promover a cultura da inovação, estimulando a pesquisa e desenvolvimento no setor elétrico brasileiro, criando novos equipamentos e aprimorando a prestação de serviços que contribuam para a segurança do fornecimento de energia elétrica, a modicidade tarifária, a diminuição do impacto ambiental do setor e da dependência tecnológica do país.*"(4).

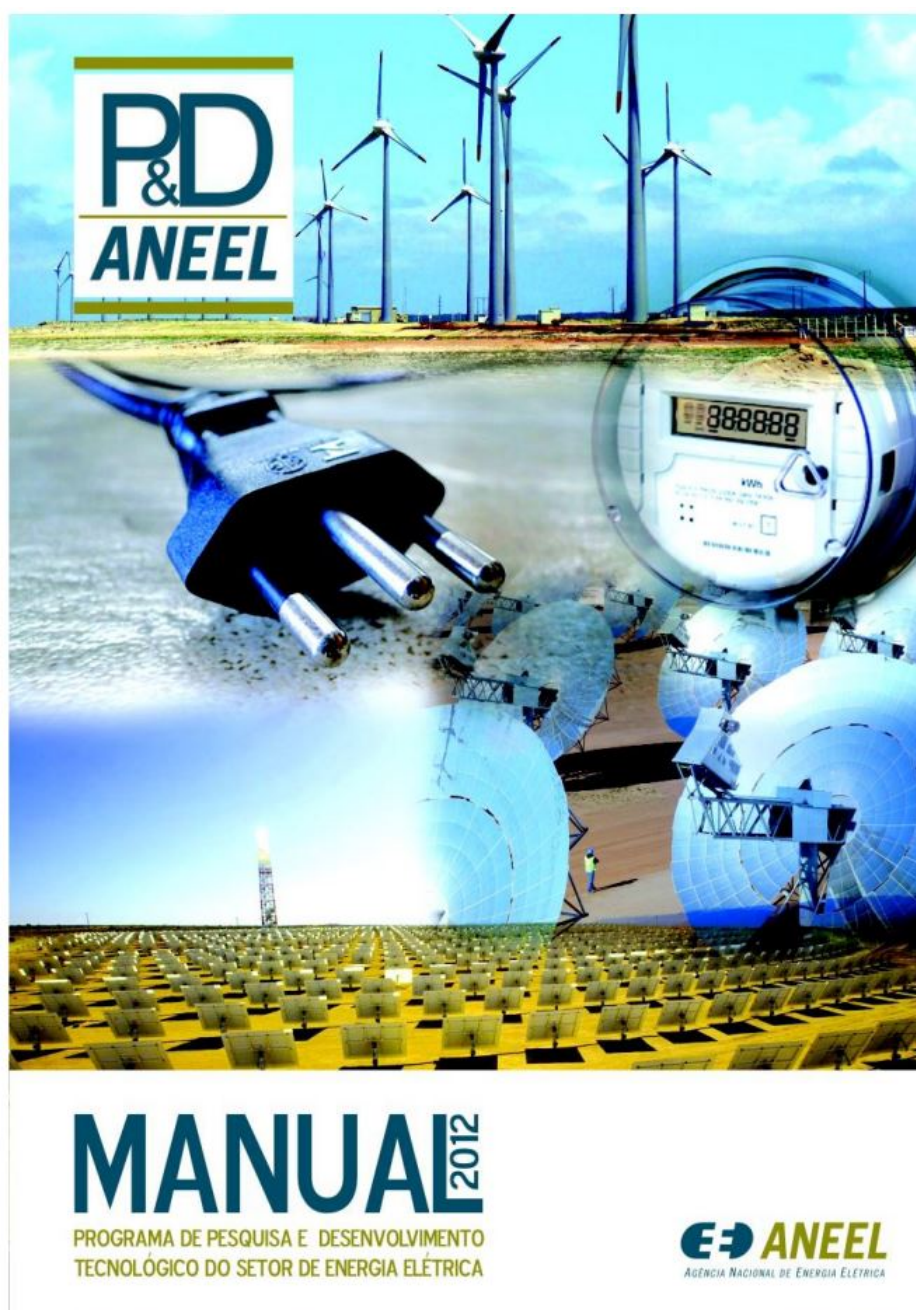
A presente dissertação atende ao Programa de P&D da EPASA dentro das linhas de pesquisas dos temas prioritários de Supervisão, Controle e Proteção de Sistemas de Energia Elétrica. Trata-se de uma metodologia que resultará na implantação de um sistema de monitoramento de sistemas de geração, que tem importância fundamental na eficiência e eficácia operativa da EPASA. Uma vez implantado permitirá um acompanhamento confiável e um rápido diagnóstico de falhas de importantes elementos do sistema de excitação dos geradores *brushless*.

A presente dissertação atende aos Subtemas Prioritários SC02 e SC08 do P&D Aneel cujo Manual vigente está representado pela figura 5:

- SC01 - Implementação de sistemas de controle (robusto, adaptativo e inteligente).
- **SC02 - Análise dinâmica de sistemas em tempo real [X]**.
- SC03 - Técnicas eficientes de restauração rápida de grandes centros de carga.
- SC04 - Desenvolvimento de técnicas para recomposição de sistemas elétricos.
- SC05 - Técnicas de inteligência artificial aplicadas ao controle, operação e proteção de sistemas elétricos.
- SC06 - Novas tecnologias para supervisão do fornecimento de energia elétrica.
- SC07 - Desenvolvimento e aplicação de sistemas de medição fasorial.

- SC08 - Análise de falhas em sistemas elétricos [X].
- SC09 - Compatibilidade eletromagnética em sistemas elétricos.
- SC10 - Sistemas de aterramento.
- SC0X - Outro.

Figura 5 – Manual 2012 do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Aneel



1.2 Objetivos

A presente dissertação busca apresentar uma metodologia de monitoramento e diagnóstico das condições operacionais dos geradores de energia elétrica que não utilizam escovas para transferência de corrente contínua para suas bobinas de campo, estes geradores são mais conhecidos como geradores *brushless* largamente utilizados em usinas termelétricas e também hidrelétricas de médio e pequeno porte. Este tipo de gerador de energia elétrica, sem escovas, possuem características construtivas que dificultam o diagnóstico em tempo de execução do conjunto que forma a parte girante da excitatriz *brushless* formado pelos enrolamentos da sua armadura e a ponte retificadora de diodos. A metodologia aqui proposta envolve a supervisão de diversas grandezas elétricas do gerador *brushless* a partir da combinação de suas grandezas, determinar as condições operacionais dos enrolamentos de campo e de armadura tanto da excitatriz como do gerador principal e estimar as condições de abertura ou curto-circuito dos diodos da ponte retificadora, dando subsídios para os operadores das usinas bem como para os gestores do planejamento e engenharia de manutenção atuar preventivamente no gerador, evitando falhas que poderiam trazer danos irreversíveis aos equipamentos e ou de elevados custos no seu reparo. A metodologia proposta tem como objetivos os seguintes benefícios para a operação e a manutenção de geradores *brushless*

- Realizar análise preditiva das condições operacionais, baseado em desvios de parâmetros operacionais;
- Favorecer ações preventivas, contribuindo para a programação da manutenção dos geradores;
- Reduzir o risco de indisponibilidade não programada do gerador integrado na rede de operação do Operador Nacional do Sistema - ONS
- Reduzir os custos inerentes às manutenções corretivas no gerador *brushless* devido a defeitos na excitatriz rotativa do gerador.
- Executar autodiagnóstico pré-operacional avaliando as condições antes do sincronismo da UG no sistema interligado nacional - SIN.

1.3 Estruturação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos, incluindo esta introdução.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais sistemas envolvidos na conversão de energia a partir de geradores *brushless* tais como os aspectos construtivos do próprio gerador, seu rotor, a máquina primária, a excitatriz *brushless* e o regulador de tensão.

No capítulo 3 são apresentadas as características da usina em estudo, sua localização física, o arranjo geo-elétrico dos barramentos de 230 kV até 13,8 kV, suas máquinas primárias, os dados técnicos dos seus geradores *brushless* o modelo e os parâmetros do sistema de excitação, do regulador de tensão, do regulador de velocidades, e as curvas de capacidade dos geradores *brushless*.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia de monitoramento e diagnóstico proposta no trabalho desta dissertação, apresentando a análise do sistema de excitação dos geradores *brushless* da usina, as variáveis utilizadas em cada bloco do sistema, desde a saída do regulador de tensão para o estator (campo) da excitatriz, passando às variáveis do rotor da excitatriz, do rotor do campo do gerador principal e por fim as variáveis de saída dos enrolamentos de armadura do gerador principal. Neste capítulo também se apresenta a sequência de aplicação do algoritmo implementado no desenvolvimento experimental descrito no capítulo 5, com as variáveis digitais e analógicas recuperadas em tempo-real bem como daquelas recuperadas em ensaios em campo, concluindo com a modelagem e mapeamento das falhas monitoradas na proposta desta dissertação.

O capítulo 5 são apresentados os resultados da implantação do desenvolvimento experimental da metodologia instalado em cinco geradores *brushless* e disponível na sala de engenharia de operação e manutenção para validação da metodologia;

Por último, no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como são feitas recomendações para futuras evoluções da mesma.

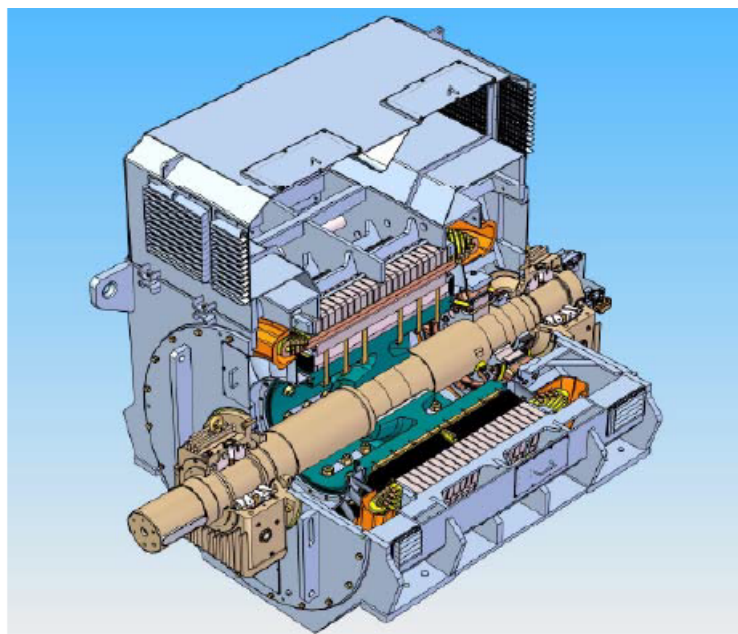
2 Revisão teórica

O presente capítulo faz uma revisão teórica dos principais elementos que serão discutidos na metodologia proposta de monitoramento e diagnóstico de falhas em rotores de geradores de energia com sistema de excitação sem escovas (*brushless*).

2.1 O gerador síncrono de corrente alternada - C.A.

O gerador síncrono é um tipo de máquina elétrica utilizada em larga escala para geração de energia elétrica em corrente alternada - C.A. O gerador síncrono de corrente alternada faz uso da ação de campos magnéticos para transformação de energia mecânica em energia elétrica (5). Este tipo de máquina elétrica girante também é do tipo reversível, isto é, tem capacidade de transformar energia elétrica em energia mecânica, transformando-se assim num motor com características de compensação reativa (6), e, neste caso, tem excelente aplicação num sistema interligado na função de compensador síncrono, absolvendo ou injetando energia reativa no sistema elétrico, para regulação da sua tensão. A figura 6 a seguir é uma representação do modelo dos geradores síncronos utilizados na geração de energia elétrica nas usinas termelétrica Termonordeste e Termoparaíba da EPASA, instaladas próxima à capital João Pessoa, no estado da Paraíba, Brasil.

Figura 6 – Gerador síncrono *brushless* das usinas da EPASA



O que distingue a operação do gerador síncrono como compensador ou gerador é o sentido do percurso da energia dentro dele, ou seja, no caso da operação como compensador síncrono, a energia elétrica “entra” pelos terminais do estator, atravessa o entreferro como fluxo magnético, e se converte em energia mecânica no eixo do rotor, enquanto que na operação como gerador a energia mecânica do eixo do rotor atravessa o entreferro na forma de fluxo magnético e se converte em energia elétrica nos terminais do estator. O termo “Síncrono” é devido a velocidade do campo magnético girante no entreferro da máquina síncrona, permanecer na mesma velocidade mecânica do eixo do gerador (7).

$$n_s = \frac{60 \cdot f_e}{p} \text{ (rpm)} \quad n_s = n_m \quad (2.1)$$

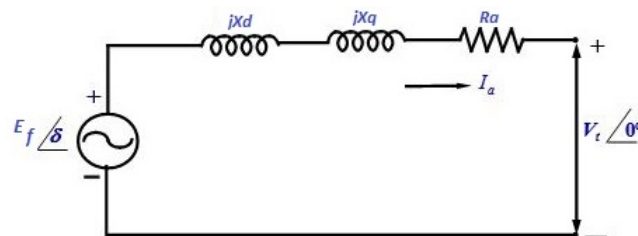
Na figura 7 estão representadas as reatâncias de eixo direto e quadratura, bem como a resistência elétrica do enrolamento da armadura, responsáveis pelas quedas de tensão da relação:

$$\dot{E}_f = \dot{V}_t + \dot{I}_a R_a + I_d j X_d + I_q j X_q$$

com

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

Figura 7 – Circuito equivalente do gerador síncrono de pólos salientes.



Quanto ao seu aspecto construtivo, os mesmos são compostos basicamente de duas partes, a primeira sendo uma estrutura externa fixa, chamada de estator, onde se acondicionam um conjunto de bobinas interligadas, geometricamente defasadas em 120 graus (em sistemas trifásicos), denominado de enrolamento de armadura, para a maioria dos casos dos geradores síncronos de campo girante, presentes na usinas hidrelétricas e termelétricas. O estator é composto de chapas laminadas que possuem ranhuras axiais onde são alojados os enrolamentos. Tem sua constituição formada por chapas justamente para criar um caminho magnético de baixa relutância, a fim de diminuir os fluxos dispersos e concentrar o campo magnético no entreferro do gerador. A segunda parte deste conjunto é interna ao estator, denominada de rotor.

2.2 O rotor do gerador síncrono de C.A.

O rotor é acoplado ao eixo do gerador, suportado em suas extremidades por mancais, tornando-o livre e girante. No rotor normalmente se encontra outro grupo de bobinas interligadas comumente conhecidas como enrolamento de campo ou enrolamento principal, onde se dá a formação do campo magnético girante que induzirá no enrolamento de armadura distribuído ao longo do estator, uma força contra eletromotriz que resultará na tensão alternada trifásica e equilibrada nos terminais do gerador.

O rotor do gerador síncrono de C.A. é responsável pela criação do campo magnético principal da máquina, sendo assim, na sua fase de projeto, pode-se optar pelo uso de um ímã permanente ou um eletroímã. Neste segundo caso, um conjunto de bobinas são acondicionadas nas sapatas polares dos rotores de polos salientes ou nas ranhuras longitudinais dos rotores de polos lisos, as quais serão alimentadas de forma direta ou indireta em corrente contínua para produção do campo magnético indutor. Desta forma, usando as palavras de Chapman (5): “O rotor de um gerador síncrono é essencialmente um grande eletroímã”. Os geradores síncronos com rotor de polos lisos são normalmente construídos com dois ou quatro polos, frequentemente utilizados em sistemas térmicos associados a turbinas que giram a velocidades de 1800 a 3600 rpm, segundo Rezek (6), em geradores de polos lisos, para diminuir os esforços mecânico devido as altas velocidades, eles são construídos com diâmetros menores porém mais cumpridos. Já os geradores de polos salientes são construídos com o diâmetro aumentado e são mais compatíveis aos esforços mecânicos atuantes no conjunto, e facilitam a sua ventilação. Estes últimos operam em baixas rotações entre 60 e 720 rpm, e são comumente encontrados em usinas hidrelétricas. A figura 8 representa o rotor de polos salientes de um gerador *brushless*.

Figura 8 – Rotor de polos salientes de um gerador trifásico.



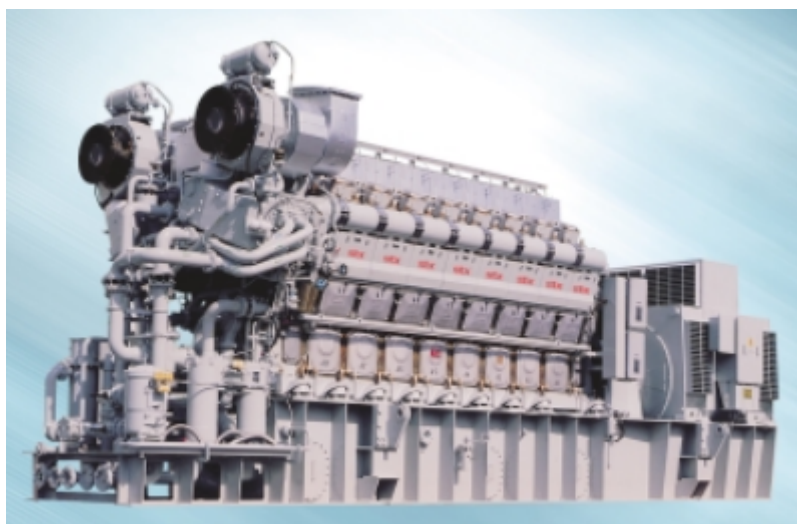
O processo de conversão de energia no gerador síncrono de C.A. se realiza por meio de fenômenos presentes no conjunto estator-rotor a partir do movimento produzido por uma fonte externa, a qual pode ser uma turbina, uma roda d'água, um motor a combustão, etc. Tais fenômenos são explicados pelas leis fundamentais da eletricidade e do magnetismo (5),(6), (7).

- Lei da indução eletromagnética, Lenz-Faraday;
- Lei do circuito elétrico, lei de Kirchhoff;
- Lei circuital do campo magnético, lei de Ampère;
- Lei da força atuante sobre condutor situado em um campo magnético, lei de Biot-Savart.

2.3 A máquina primária ou turbina

Ao eixo do rotor do gerador síncrono acopla-se uma turbina ou máquina primária, a qual será responsável pelo giro mecânico do mesmo e também pela potência elétrica disponibilizada pelo gerador ao sistema elétrico ao qual se encontra conectado. A EPASA utiliza motores à combustão conforme o modelo apresentado na figura 9. Máquinas primárias

Figura 9 – Modelo da máquina primária da UTE EPASA



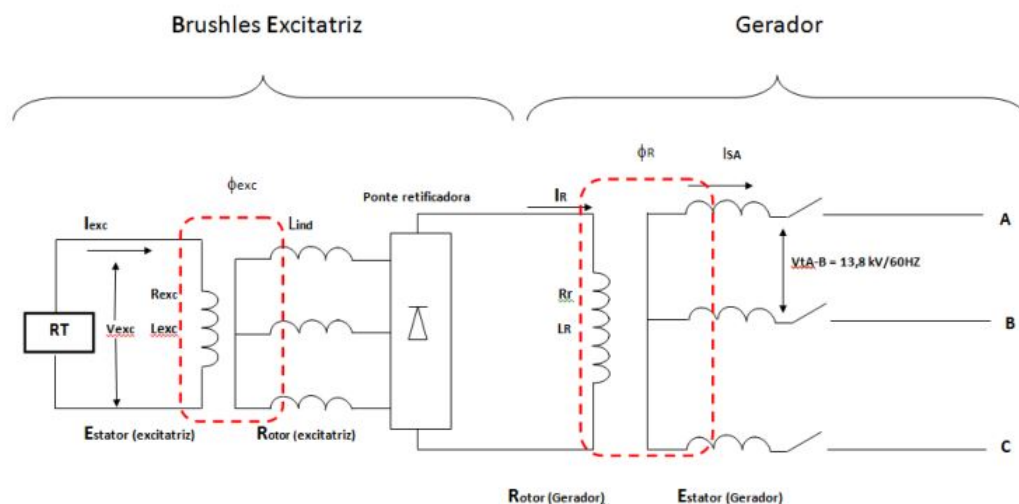
rias ou turbinas pode ser movimentada por meio do aproveitamento da energia potencial hidráulica, criada naturalmente em rios com elevadas quedas d'água, ou artificialmente por meio da criação de uma barragem transversal no leito do rio, formando em muitos casos, os reservatórios para controle de cheias e otimização dos aproveitamentos energéticos. A potência elétrica das turbinas utilizadas em usinas hidrelétricas está associada ao produto da altura líquida da barragem (H) e a vazão volumétrica do rio (Q). Nas usinas

térmicas a vapor, a queima de biomassas ou mesmo derivados de petróleo em caldeiras produz o calor e o vapor de água necessário para a produção do movimento do eixo da turbina cuja potencia está associada na maioria dos casos ao ciclo de Rankine. Há também o caso de usinas térmicas movidas a turbinas a gás, de ciclo combinado (vapor + gás), aero turbinas e ainda aquelas que se utilizam de motores a combustão movidos a óleo pesado (tipo B1) e diesel como já foi informado.

2.4 A excitatriz *brushless*

O sistema de excitação dos geradores da EPASA é do tipo Brushless que possui como principal vantagem a inexistência de anéis coletores e escovas para a alimentação do campo do gerador. A representação de um sistema de excitação *brushless* pode ser verificado na figura 10:

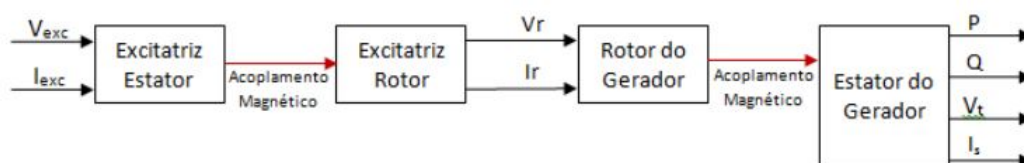
Figura 10 – Representação elétrica da excitatriz *brushless*.



Neste tipo de excitação, os anéis e escovas perderam a sua finalidade devido ao fato do acoplamento entre a excitatriz e o campo do gerador ser eletromagnético. Assim, houve um progresso significativo no que tange o sistema de excitação, haja vista que deixaram de existir os costumeiros problemas relacionados ao contato anel-escova e, também, houve uma redução significativa na potência do circuito de alimentação do campo quando comparada à excitação estática. De um modo geral, analogamente a um gerador síncrono, na excitatriz o fluxo magnético é produzido através da circulação de corrente contínua nas bobinas dos pólos, resultando na indução de três tensões defasadas eletricamente de 120 graus. No entanto, a diferença preponderante com relação ao princípio de operação dos geradores síncronos consiste no fato de que na excitatriz Brushless os pólos estão dispostos na estrutura do estator enquanto que os enrolamentos de armadura estão no rotor acoplado ao eixo girante do gerador.

Os enrolamentos de campo dos geradores síncronos de C.A., de forma geral, têm suas extremidades conectadas a um par de anéis coletores, ambos acoplados ao eixo girante do gerador. Estes anéis fazem contatos mecânicos e direto com escovas estacionárias de carbono ou carvão, pelas quais a alimentação em C.C. é transmitida para cada conjunto de bobinas que formam este enrolamento de campo presente no rotor. Inicialmente dispunha-se de uma fonte externa, um motor de indução acionava um gerador de corrente contínua que alimentava o campo principal do gerador, posteriormente passou-se a incorporar um gerador de corrente contínua ao próprio eixo do gerador principal, uma prática muito utilizada antes do surgimento dos retificadores a estado sólido, pelos quais foi possível o desenvolvimento de sistemas externos de excitação a partir de fontes C.A., mas que logicamente se utilizavam do acoplamento mecânico com os polos do gerador a partir do uso de escovas de carbono e anéis coletores. Por último temos o sistema de excitação do tipo *brushless* que significa "sem escovas", eliminando muitos problemas devido a presença de escovas e mau-contatos. Nos geradores síncronos tipo *brushless*, a corrente contínua (C.C.) para excitação dos polos do gerador não circula diretamente da fonte externa de C.C. para o campo, como nos casos com uso de anel e escovas, mas de forma indireta, isto é, por acoplamento magnético. Uma fonte externa C.C., normalmente um sinal de saída do Regulador Automático de Tensão, o qual ao receber amostras da tensão terminal do gerador principal, alimentará com tensão constante modulada por largura de pulso - *PWM* - *Pulse Width Modulation* o gerador síncrono auxiliar (campo da excitatriz), montada sobre, mas sem que haja vínculo galvânico com o circuito do campo do gerador principal. Assim, haverá a indução de uma força eletromotriz nos enrolamento de armadura deste mesmo gerador síncrono auxiliar, este sim acoplado eletricamente ao circuito girante do gerador principal. A força eletromotriz de corrente alternada será transferida para uma ponte retificadora trifásica, a qual será a fonte de corrente contínua para excitação dos polos do gerador principal. Como explicado, este sistema dispensa o uso de escovas para acoplamento dos circuitos dos enrolamentos girantes dos polos do gerador (rotor) e sua armadura estacionária (estator). O sistema de excitação *brushless* reduz consideravelmente os custos operacionais bem como elimina a presença de anéis coletores no eixo do gerador. A figura 11 representa o diagrama de blocos e as variáveis de entrada e saída da excitatriz *brushless* da EPASA.

Figura 11 – Diagrama de blocos da excitatriz *brushless*.



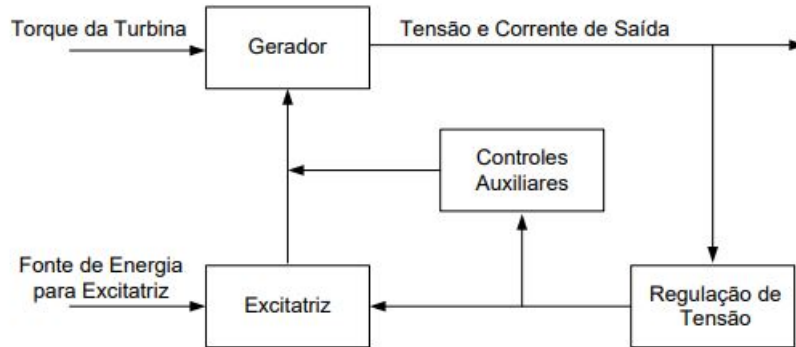
No seu início, com geradores de energia de menor porte nas usinas, as excitatrizes com comutação a escovas atendiam satisfatoriamente os mantenedores dos empreendimentos de geração e as demandas de energia. Com o desenvolvimento da indústria, o crescimento demográfico e o conseqüentemente aumento da demanda em escala mundial, as máquinas elétricas rotativas foram sendo projetadas com potências cada vez maiores, requisitando correntes de excitação cada vez maiores, e distribuídas em conjuntos maiores de escovas. As conseqüentes paradas forçadas para resfriamento dos anéis coletores, os custos de paradas para substituição das escovas, os problemas de faiscamentos nos comutadores, quando da variação abrupta de cargas, dentre outras causas, motivou as universidades, os centros de pesquisas e a indústria pelo desenvolvimento de uma tecnologia nova para o sistema de excitação de geradores. A partir deste ponto e considerando o desenvolvimento da indústria eletrônica na fabricação de retificadores estáticos a diodos, posteriormente a tiristores, tornou-se viável o desenvolvimento de sistemas de excitação de corrente alternada – C.A., tais como:

- Excitatriz de campo rotativo com retificador estático a diodos;
- Excitatriz estática com tiristores;
- Excitatriz sem escovas ou brushless.

A excitatriz brushless foi uma evolução natural dos sistemas de excitação de corrente alternada, citando Galvão (8) “uma grande vantagem da excitatriz brushless é a eliminação definitiva dos anéis coletores e escovas. Por volta de 1960, os engenheiros da Westinghouse Electric Corporation conseguiram aplicar este sistema de excitação em geradores com potências maiores, favorecendo o início da sua aplicação em grande escala”.

Embora tenham ocorridos avanços na indústria de desenvolvimento dos geradores síncronos C.A. com sistema de excitação brushless, eliminando muitos dos problemas técnicos apontados anteriormente, tal sistema dificulta o monitoramento da corrente de excitação dos polos principais do gerador bem como a verificação da queima de elementos na ponte retificadora girante. A presente pesquisa foi motivada pela queima de polos em geradores brushless de um importante agente de geração do Brasil. Defeitos em ponte retificadoras não controladas girantes exigem altas correntes de excitação, o que pode levar a altas temperaturas nos enrolamentos dos polos e sua conseqüente queima. A presente pesquisa estabelece uma metodologia de monitoramento e diagnóstico deste tipo de geradores síncronos C.A. com excitatriz brushless. A figura 12 é um modelo típico dos componentes deste sistema (9)

Figura 12 – Componentes típicos do sistema de excitação

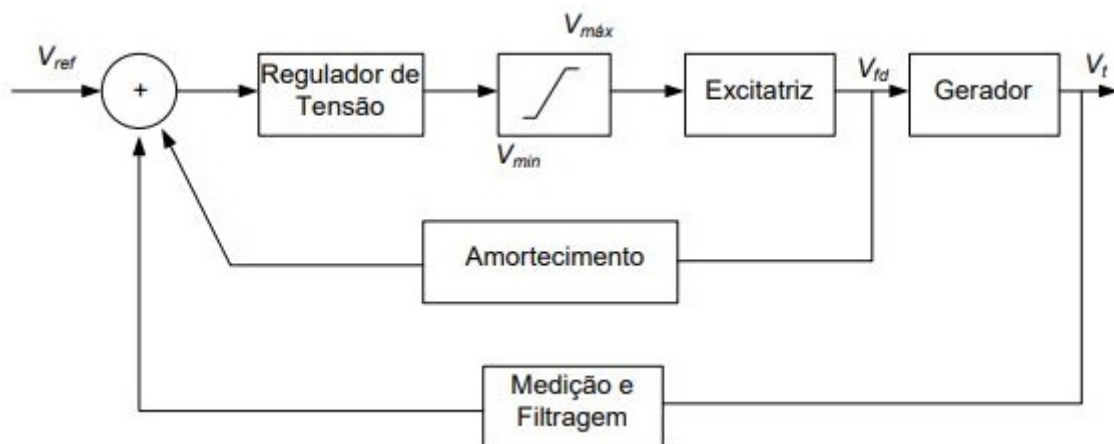


2.5 O Regulador Automático de Tensão - RAT

A excitatriz *brushless* como elemento comutador é responsável pela tensão interna do gerador síncrono e conseqüentemente pela tensão de saída da máquina, mas o regulador de tensão que a alimenta é de fato o elemento controlador capaz de manter constante a tensão de saída do gerador, mesmo em face de variações do tipo da carga, se predominantemente indutiva ou capacitiva e/ou sua variação em módulo. O regulador automático de tensão, portanto, se encontra numa malha fechada de controle, usualmente em tecnologia PID (Proporcional Integral Derivativa), processando o sinal de saída do gerador, sua tensão, frequência e fase, comparando-a com a referência de tensão proposta para o gerador a cada momento. A diferença encontrada é corrigida seguindo critérios de estabilidade dinâmica e uma nova referência (“erro de tensão”) servirá a excitatriz para corrigir a tensão interna do gerador de forma a manter constante a tensão terminal da máquina.

O regulador de tensão do sistema de excitação utilizado nos geradores *brushless* da EPASA é do tipo digital, microprocessado, que permite programações e configurações dos parâmetros do sistema de excitação para controle do campo do gerador.

Figura 13 – Diagrama de blocos do sistema de regulação de tensão.

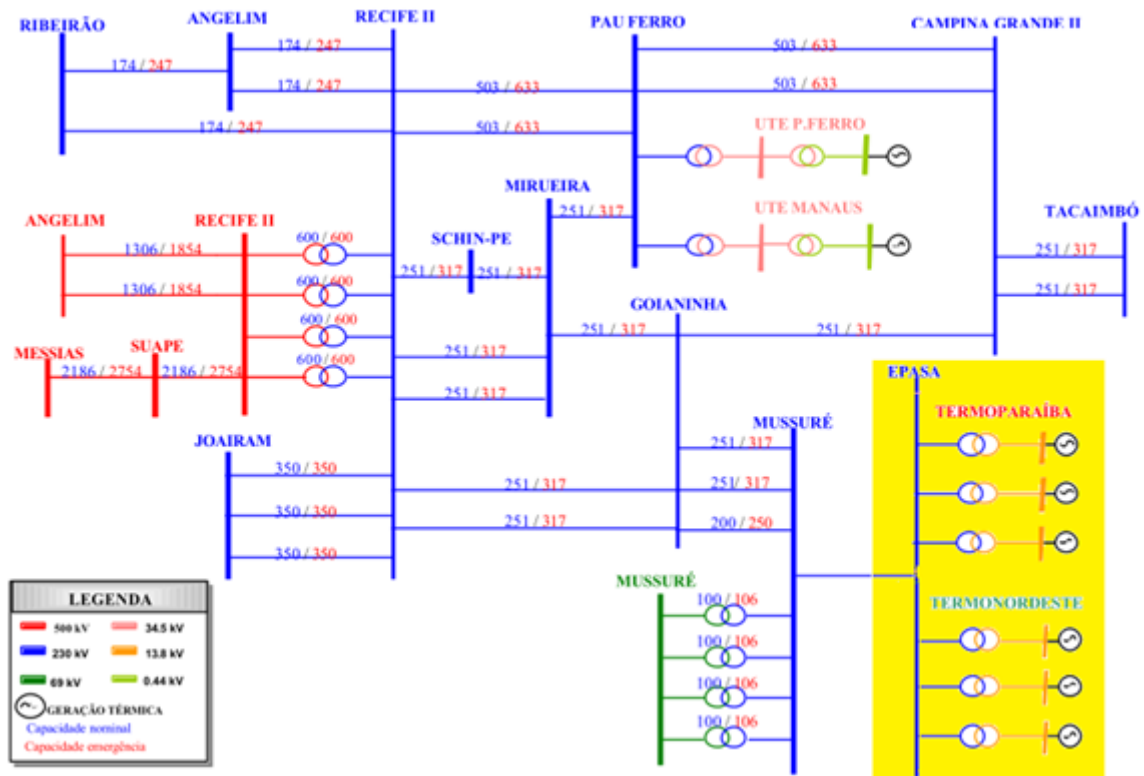


3 A Termelétrica em estudo

O presente estudo se apresenta como contribuição acadêmica a um projeto de pesquisa e desenvolvimento, patrocinado pela EPASA, no âmbito de suas obrigações regulatórias da concessão das suas usinas TERMONORDESTE E TERMOPARAÍBA. A figura 14 apresenta o diagrama geo-elétrico em que a usina se encontra inserida no âmbito do Sistema Interligado Nacional - SIN.

3.1 Diagrama geoeletrico das usinas da EPASA

Figura 14 – Configuração do sistema geoeletrico das UTEs da EPASA.



As usinas Termonordeste e Termoparaíba estão localizadas na região nordeste do Brasil, próximo a cidade de João Pessoa na Paraíba. Está conectada na rede básica do sistema interligado nacional, por meio de um circuito de 230kV na subestação de Mussurê II pertencente a CHESF.

3.2 Dados técnicos dos geradores da termelétrica em estudo

A termelétrica em estudo é formada por duas usinas térmicas as quais são constituídas de 20 geradores de energia tipo brushless cada uma. Trinta e oito deles tem potência nominal de 10,954 MVA, com geração máxima de 8,763 MW por unidade, e os outros dois geradores, um em cada UTE, tem potência aparente de 5,444 MVA, com geração máxima de 4,355 MW cada. A Tabela 1 apresenta os parâmetros técnicos de todos estes geradores.

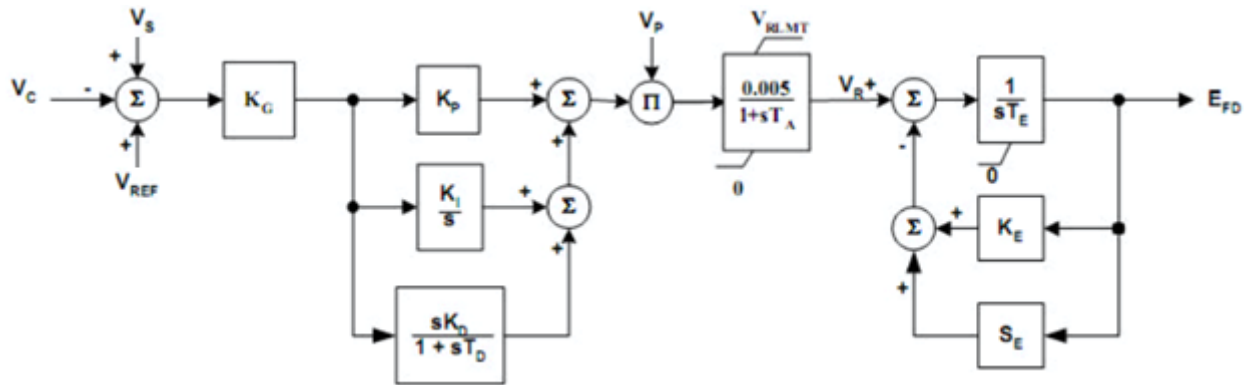
Tabela 1 – Parâmetros dos 40 geradores *brushless* das usinas.

Descrição	Símbolo	Unidade	G1-G19 G21-G39	G20 e G40
Potência Aparente Nominal	S_N	MVA	10.954	5.444
Potência Ativa Nominal	P_N	MW	8.763	4.355
Tensão Terminal Nominal	U_N	kV	13.8	13.8
Corrente de Armadura Nominal	I_N	A	458.3	227.8
Fator de Potência Nominal	\cos	-	0.8	0.8
Frequência Nominal	F_N	Hz	60	60
Velocidade Nominal	n_N	rpm	720	720
Corrente de Excitação em Vazio	I_0	A	158	226
Tensão de Excitação em Vazio	V_0	V	58	85
Constante de tempo de transitória de eixo direto em vazio	T'_{d0}	S	3.76	3.76
Constante de tempo de subtransitória de eixo direto em vazio	T''_{d0}	S	0.0107	0.0187
Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura	T''_{q0}	S	0.030	0.0751
Reatância síncrona de eixo direto (não saturada)	X_d	pu	1.55	1.9
Reatância síncrona de eixo quadratura (não saturada)	X_q	pu	0.73	1.47
Reatância transitória de eixo direto (não saturada)	X'_d	pu	0.25	0.277
Reatância transitória de eixo quadratura (não saturada)	X'_q	pu	0.73	1.47
Reatância subtransitória de eixo direto (não saturada)	X''_d	pu	0.144	0.195
Reatância de dispersão do estator	X_L	pu	0.0884	0.126
Resistência do estator por fase	R_a	pu	0.0067	0.9
Constância de Inércia Geral (partes girantes)	H	MW.s/MVA	1.442	1.504

3.3 Modelos e dados dos sistemas de controle da excitação

O diagrama de blocos do sistema de controle da excitação da térmica em estudo é apresentado na figura 15.

Figura 15 – Diagrama de blocos do sistema de excitação.



Para o controle da excitatriz “brushless” é utilizado o regulador de tensão modelo DECS-200 da BASLER ELECTRIC. Os principais blocos deste sistema estão apresentado nas figuras 16 e 17 a frente:

Figura 16 – Diagrama de blocos do limitador de subexcitação.

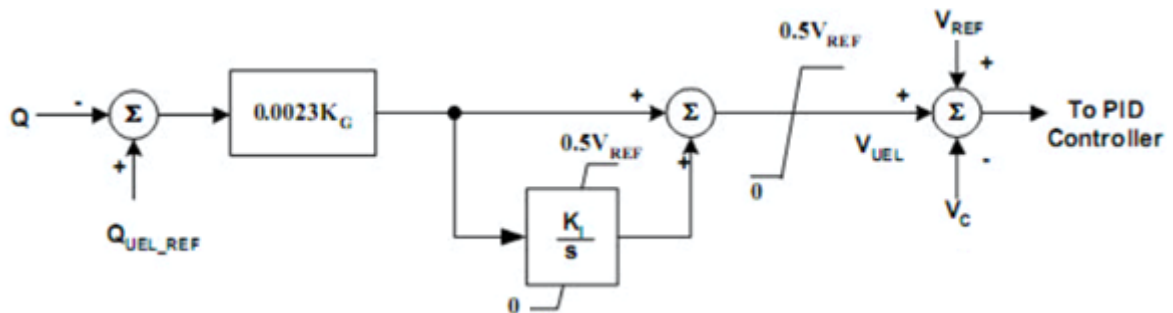
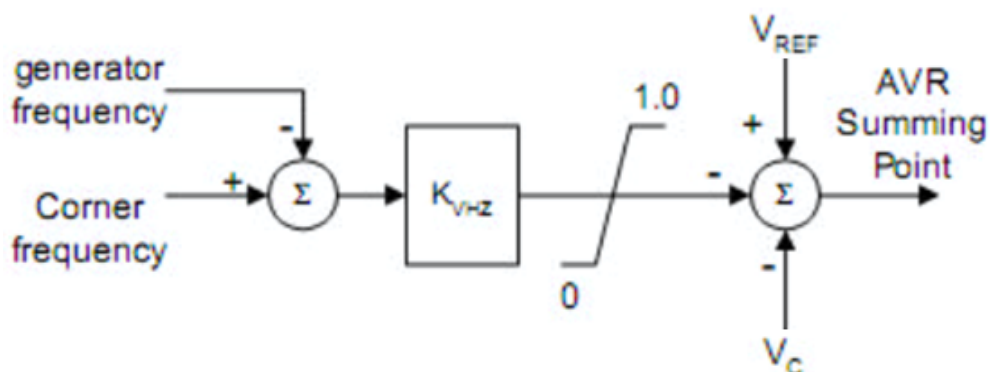


Figura 17 – Diagrama de blocos do limitador volts x hertz.



3.4 Definição dos parâmetros do sistema de excitação

A tabela 2 apresenta os valores parametrizados nos blocos do sistema de excitação.

Tabela 2 – Definição dos parâmetros do sistema de excitação

Parâmetro	Descrição	Unidade	Gerador de 10,954 MVA	Gerador de 5,444 MVA
X_C	Estatismo de tensão	pu	0,04	0,04
K_G	Ganho da malha do regulador de tensão	-	8	15
K_{GUEL}	Ganho da malha do controlador UEL	-	60	60
K_{IUEL}	Ganho integral do controlador UEL	-	100	100
K_{VHZ}	Ganho do controlador Volt/Hertz	-	1,5	1,5
F_{OR}	Ajuste de frequência da unidade Volt/Hertz	pu	0,933	0,933
K_P	Ganho proporcional do regulador de tensão	-	150	75
K_I	Ganho integral do regulador de tensão	-	40	20
K_D	Ganho derivativo do regulador de tensão	-	15	6
T_D	Constante de tempo do regulador derivativo	S	0,01	0,01
V_p	Constante da malha do regulador de tensão	pu	2,5	2,67
VR_{LMT}	Limite superior do regulador de tensão	pu	3,5	3,733
T_E	Constante de tempo da excitatriz	S	0,3	0,26
K_E	Ganho da excitatriz	-	0,7	0,7
A_{ex}	Parâmetro de saturação da excitatriz	pu	0,09826	0,9826
B_{ex}	Parâmetro de saturação da excitatriz	pu	0,6198	0,6198

3.5 Modelos e dados dos sistemas de controle de velocidades

Os geradores de 10,954 MVA utilizam motores (“engine”) com potência de 9,034 MW, os parâmetros de ajustes do regulador de velocidades destes motores estão descritos na tabela 3, enquanto os geradores de 5,444 MVA utilizam os motores de 4,532 MW e a figura 4 apresenta os dados do seu regulador de velocidades. Em ambas as máquinas são utilizados reguladores HZM DC 1-04 com atuadores StG 180 e StG 90 para os geradores de 10,954 MVA e 5,444 MVA respectivamente. A estrutura do sistema de controle de velocidade é apresentada na Figura 18:

Figura 18 – Diagrama de blocos do sistema de regulação de velocidades conforme o fabricante.

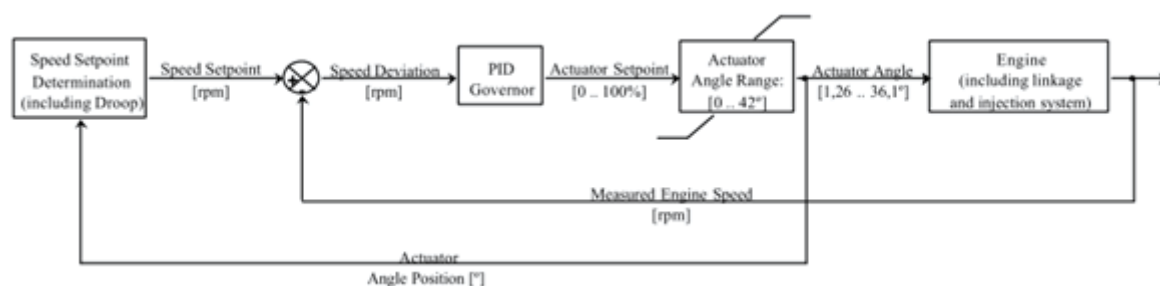


Tabela 3 – Ajustes do regulador de velocidade das unidades de 10,954 MVA

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
P_{FAC}	Ganho proporcional do regulador	60,0	-
I_{FAC}	Ganho integral do regulador	-	-
D_{FAC}	Ganho derivativo do regulador	10,0	-
D_{ROOP}	Estatismo de regime permanente	4,0	%
N_{NOM}	Rotação nominal do motor	720	rpm
PN_{MOTOR}	Potência nominal do motor	9034	MW

Tabela 4 – Ajustes do regulador de velocidade das unidades de 5,444 MVA

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
P_{FAC}	Ganho proporcional do regulador	60,0	-
I_{FAC}	Ganho integral do regulador	-	-
D_{FAC}	Ganho derivativo do regulador	10,0	-
D_{ROOP}	Estatismo de regime permanente	4,0	%
N_{NOM}	Rotação nominal do motor	720	rpm
PN_{MOTOR}	Potência nominal do motor	4523	MW

3.6 Curvas de capacidade dos geradores brushless

As curvas de capacidade (10) dos geradores brushless de 5,444 MVA e 10,954MVA são mostradas nas Figuras 19 e 20 respectivamente:

Figura 19 – Curva de capacidade dos geradores de 5,444 MVA da EPASA.

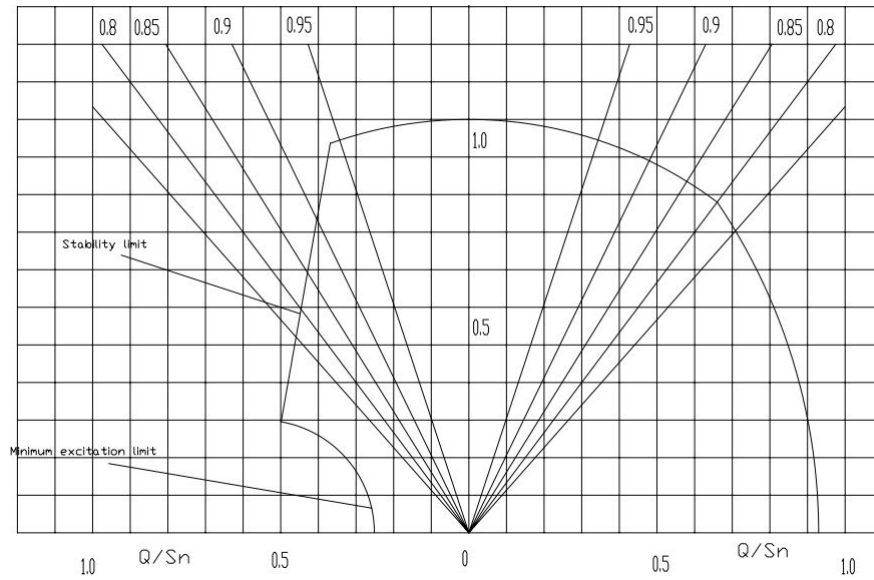
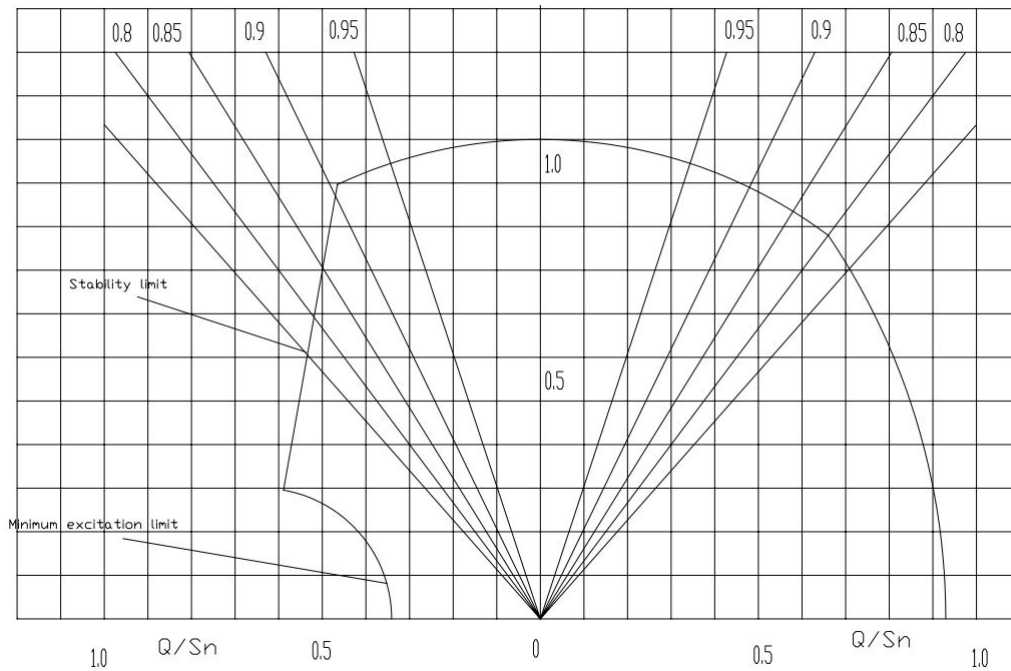


Figura 20 – Curva de capacidade dos geradores de 10,954 MVA da EPASA.



3.7 Curvas a vazio e de curto-circuito dos geradores brushless

As curvas de característica a vazio e de curto-circuito dos geradores brushless de 5,444 MVA e 10,954MVA são mostradas nas Figuras 21 e 22 respectivamente:

Figura 21 – Curva a vazio e de curto-circuito dos geradores de 5,444 MVA da EPASA.

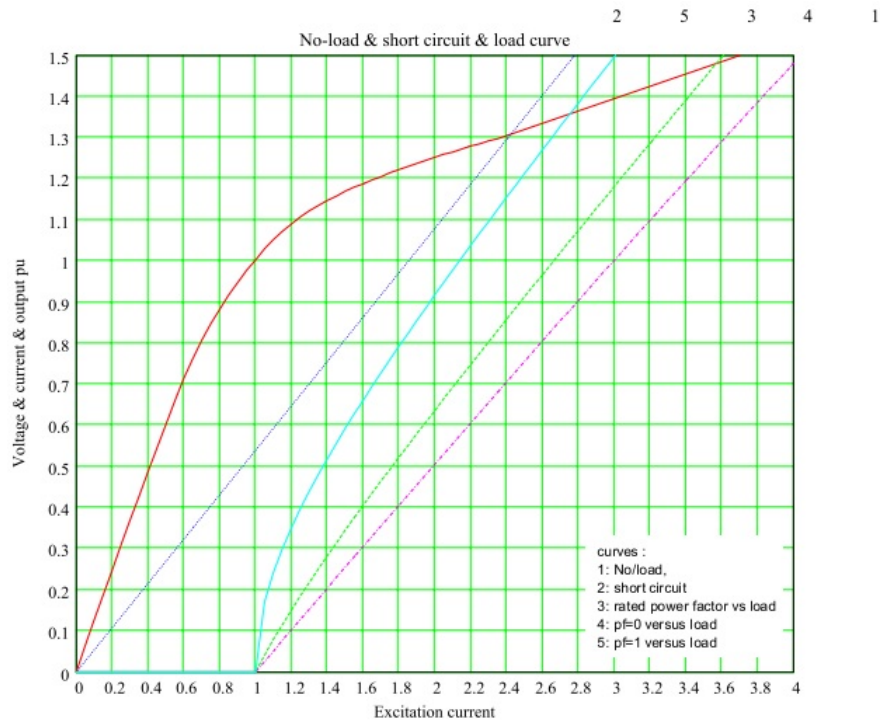
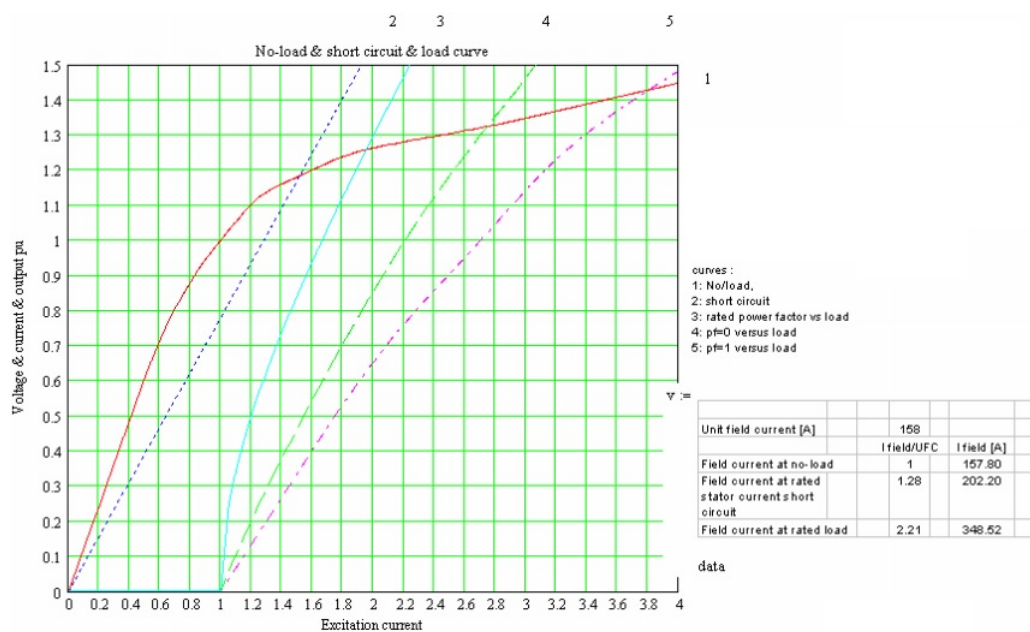


Figura 22 – Curva a vazio e de curto-circuito dos geradores de 10,954 MVA da EPASA.



3.8 Especificações dos geradores *brushless*

As fichas com as especificações técnicas dos geradores brushless de 5,444 MVA e 10,954MVA são mostradas na figura 23 a frente:

Figura 23 – Fichas de especificações técnicas dos geradores de 5,444 e 10,954 MVA da EPASA

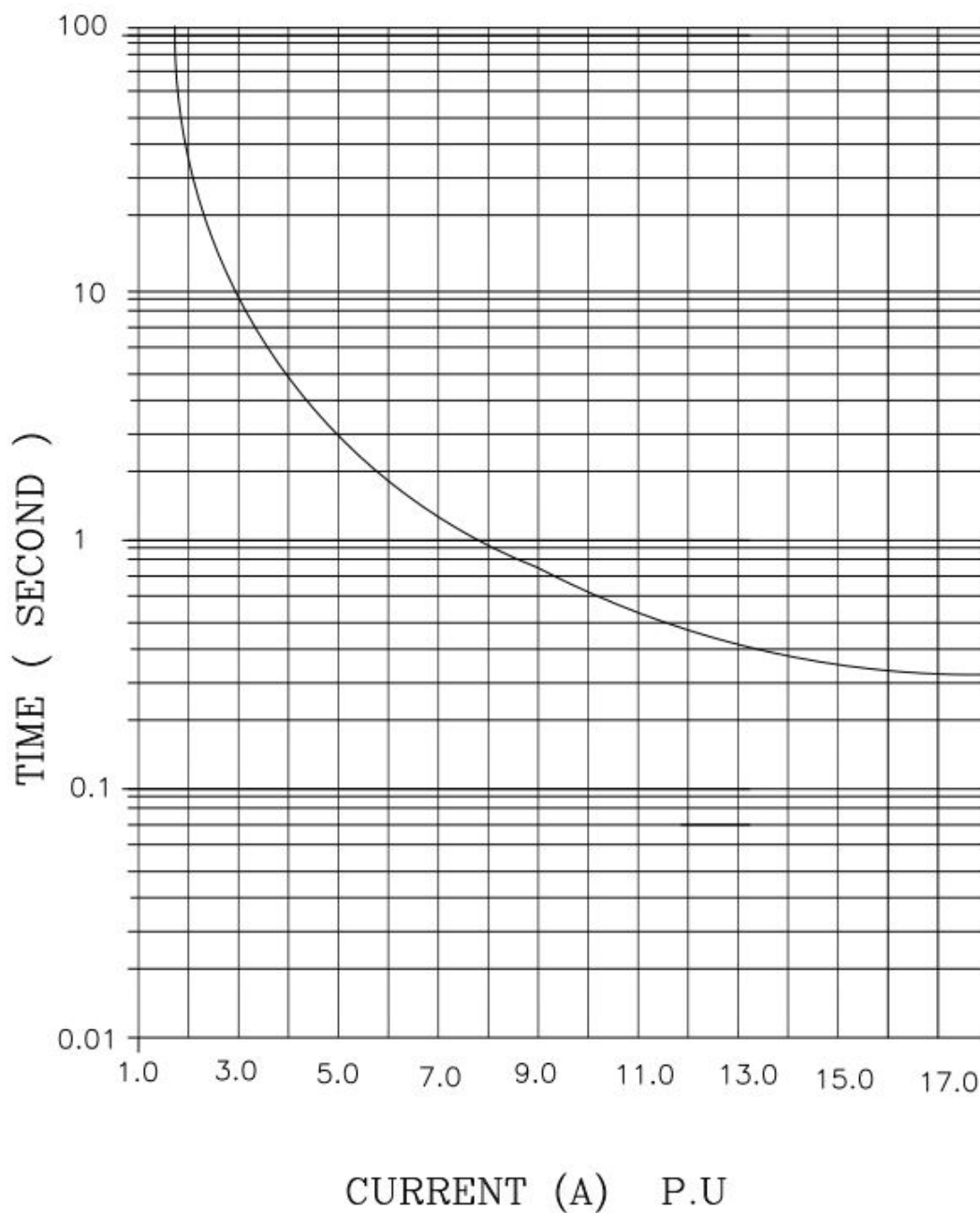
USE	DIESEL ENGINE GENERATOR		
TYPE OF ENCLOSURE	IP 23		
COOLING SYSTEM	AIR TO AIR		
EXCITING SYSTEM	SELF EXCITING BRUSHLESS		
STRUCTURE OF ROTOR	CYLINDRICAL ROTOR		
COUPLING METHOD	FLEXIBLE		
SPECIFICATION			
TYPE	HSR7 943-10P		
OUTPUT CAPACITY	5444.0 KVA		
RATING	CONTINUOUS		
PHASES, WIRE, CONN	3 Φ , 4 W, Y (DAMPER WINDING)		
VOLTAGE	AC 13800 V		
CURRENT	227.8 A		
FREQUENCY	60 Hz		
POLES	10 P		
SPEED	720 RPM		
POWER FACTOR	0.8 LAGGING		
GD ² / J	5228.0 Kg.m ² / 1307 Kg.m ²		
ROTOR WEIGHT	9290 Kg		
TOTAL WEIGHT	23.5 ton		
CHARACTERISTICS			
OVER CURRENT	150 % / 2 min.		
VARIATION OF GENERATOR VOLTAGE	± 2.5 %		
OVER SPEED	120 % / 2 min.		
VOLTAGE ADJUST	± 10.0 %		
MOUNTING METHOD	IM1101(B20)		
REACTANCE & TIME CONSTANT (CALCULATED VALUE)			
Xd	190 %(UNSATURATED)	T' d	0.2642 Sec.
X' d	24.3 %(SATURATED)	T'' d	0.0104 Sec.
X'' d	13.5 %(SATURATED)	Ta	0.0385 Sec.
ra	0.9 %		

USE	DIESEL ENGINE GENERATOR		
TYPE OF ENCLOSURE	IP 23		
COOLING SYSTEM	AIR TO AIR		
EXCITING SYSTEM	SELF EXCITING BRUSHLESS		
STRUCTURE OF ROTOR	SALIENT POLE ROTOR		
COUPLING METHOD	FLEXIBLE		
SPECIFICATION			
TYPE	HSGD 1011 K10		
OUTPUT CAPACITY	10954.0 KVA		
RATING	CONTINUOUS		
PHASES, WIRE, CONN	3 Φ , 4 W, Y (DAMPER WINDING)		
VOLTAGE	AC 13800 V		
CURRENT	458.3 A		
FREQUENCY	60 Hz		
POLES	10 P		
SPEED	720 RPM		
POWER FACTOR	0.8 LAGGING		
GD ² / J	13000.0 Kg.m ² / 3250 Kg.m ²		
ROTOR WEIGHT	15275 Kg		
TOTAL WEIGHT	43.5 ton		
CHARACTERISTICS			
OVER CURRENT	150 % / 2 min.		
VARIATION OF GENERATOR VOLTAGE	± 2.5 %		
OVER SPEED	120 % / 2 min.		
VOLTAGE ADJUST	± 10.0 %		
MOUNTING METHOD	IM1101(B20)		
REACTANCE & TIME CONSTANT (CALCULATED VALUE)			
Xd	155 %(UNSATURATED)	T' d	0.65 Sec.
X' d	22.0 %(SATURATED)	T'' d	0.006 Sec.
X'' d	12.3 %(SATURATED)	Ta	0.057 Sec.
ra	0.49 %		

3.9 Curva de capacidade térmica dos geradores *brushless*

A curva de capacidade térmica dos geradores brushless de 5,444 MVA e 10,954MVA são mostradas na figura 24 a frente:

Figura 24 – Curva de capacidade térmica dos geradores de 5,444 e 10,954 MVA da EPASA



4 A metodologia de solução

O presente capítulo faz uma apresentação da estruturação de como foi desenvolvida a metodologia para o monitoramento e diagnóstico de falhas de geradores de energia com sistema de excitação *brushless*.

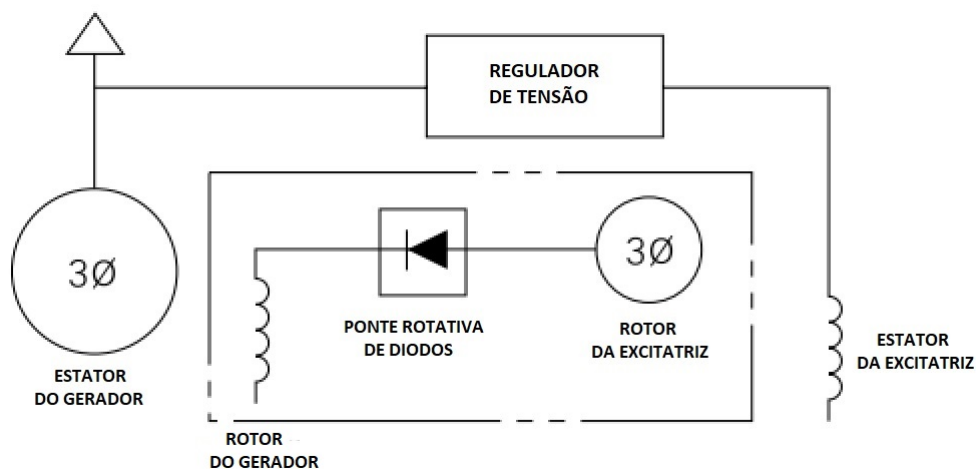
4.1 Análise preliminar à metodologia proposta

O sistema de excitação dos geradores da termelétrica em estudo é do tipo *brushless*. Portanto, esta pesquisa foi direcionada para suprir uma importante lacuna de ferramentas comerciais, de baixo custo de implantação, para o diagnóstico em tempo real, de problemas operacionais de geradores com este tipo de excitação do campo.

Atuando de forma conjunta com o Regulador Automático de Tensão - RAT, a excitatriz brushless é responsável pela manutenção da potência reativa requisitada pelo sistema elétrico, pelo controle do fator de potência, bem como pela regulação da tensão terminal no barramento da usina quando operando radialmente com a rede elétrica ou fora de um sistema de barramento infinito. Tais controles podem ser efetivados manualmente, pelo operador da usina, no ajuste do reostato de campo da excitatriz, alterando a tensão e corrente de excitação, ou automaticamente pelo regulador automático de tensão, numa malha fechada de controle proporcional, integral e derivativo - PID.

A figura 25 representa o conjunto Gerador principal x Excitatriz *brushless* utilizado nas usinas em estudo.

Figura 25 – Gerador principal representado com sua excitatriz *brushless* independente

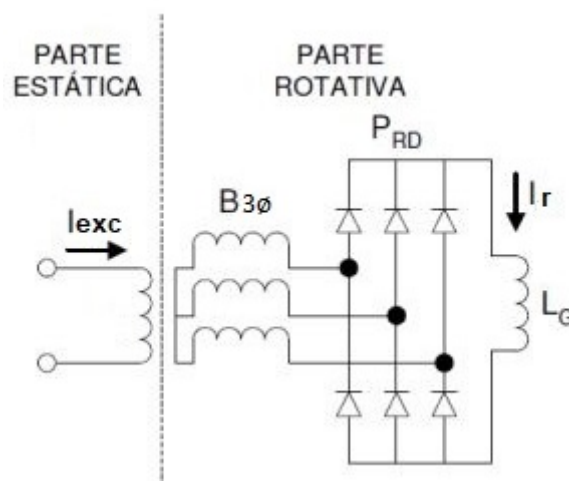


A dificuldade de monitoramento de sistemas de excitação *brushless* advém do fato que não há acoplamento mecânico entre a excitatriz e o campo principal do gerador. Porém, com o desenvolvimento de retificadores estáticos a estado sólido, presentes internamente no regulador de tensão e representado na figura 25 pela ponte rotativa de diodos, os sistemas de excitação *brushless* passaram a ter um custo mais atrativos para os construtores de usinas, como também este advento permitiu a construção de geradores *brushless* de maior potência, e contribuiu também para a redução do circuito de potência de alimentação do campo do gerador principal, comparado aos sistemas com uso de escovas.

Outro ponto importante a se considerar, é que este novo sistema *brushless* trouxe uma diminuição de indisponibilidades forçadas de unidades geradoras nas usinas, por conta da diminuição dos problemas relacionados aos faiscamentos, desalinhamentos, substituições e ajustes mecânicos nos conjuntos de escovas em contato com os anéis coletores.

Podemos considerar consoante à literatura (5),(6),(7), que o princípio de funcionamento de geradores síncronos de corrente alternada *brushless*, como estes em estudo, tem sua fundamentação no uso de um gerador síncrono C.A. auxiliar, de campo invertido, montado "abraçando" o eixo do gerador principal, tendo a sua armadura girante, fisicamente acoplado a este eixo. Este gerador síncrono de C.A. auxiliar, ao receber tensão e corrente contínua do regulador de tensão produzirá nas bobinas de seus polos girantes uma força eletromotriz induzida alternada e defasadas em 120 graus, as quais serão retificadas pela ponte de diodos rotativa entregando uma tensão de excitação V_r e corrente de excitação I_r aos enrolamentos de campo instalado no rotor do gerador principal, cujo fluxo magnético resultante produzirá a força eletromotriz induzida na armadura do gerador. A figura 26 representa as ligações das partes estática e móvel da excitatriz utilizada nos geradores *brushless* da Epasa.

Figura 26 – Configuração da excitatriz C.A. *brushless*

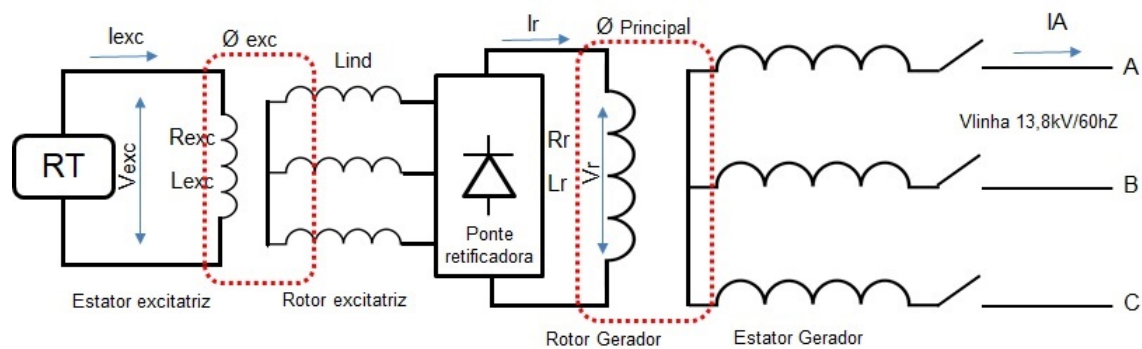


A legenda da figura 26 é a seguinte:

- I_{exc} - corrente do campo da excitatriz (parte estática);
- $B_{3\phi}$ - enrolamento de armadura da excitatriz (parte rotativa);
- P_{RD} - ponte trifásica rotativa à diodo;
- I_r corrente no campo do gerador principal;
- L_G enrolamento de campo do gerador principal.

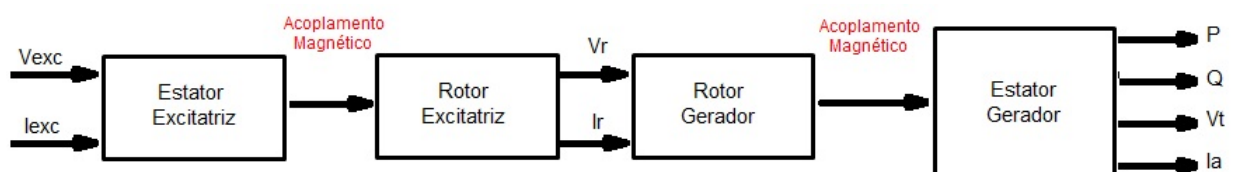
A vantagem de utilizar uma excitatriz independente está na redução da potência do circuito de alimentação, é facilmente perceptível que com um baixo valor de I_{exc} produz-se um elevado valor de I_r no acoplamento magnético. No entanto, com a inexistência de um contato direto entre anel-escova, nos geradores Brushles não há um monitoramento da corrente de campo I_r do gerador e, conseqüentemente, não se tem informação da temperatura do rotor do gerador, a qual é função desta. Para facilitar a compreensão das variáveis e pontos de monitoramento propostos nesta metodologia, a figura 27 descreve o conjunto Gerador/Excitatriz (10) (11) (12) (13).

Figura 27 – Representação do conjunto com as variáveis de controle



A partir desta representação passamos ao seu diagrama de blocos o qual mostra a interface e correlação das variáveis do processo nesta metodologia, e, de posse das informações contidas no diagrama de blocos é possível extrair as correlações que originarão as equações do sistema (10).

Figura 28 – Representação do conjunto com as variáveis de controle



As variáveis de entrada a serem interpretadas e convertidas são as relacionadas na tabela 5:

Tabela 5 – Descrição das variáveis de entrada

Variáveis de entrada	Descrição
P	Potência Ativa]
Q	Potência Reativa
V_t	Tensão terminal
I_a	Corrente de Armadura da fase A
I_{exc}	Corrente de excitação
V_{exc}	Tensão de excitação

A partir da leitura das variáveis de entrada descritas na tabela 5, foram desenvolvidos os algoritmos que farão o diagnóstico e o monitoramento das grandezas elétricas que influenciam na geração e controle dos fluxos magnéticos do gerador *brushless* e por consequência no seu comportamento operacional. Os desenvolvimentos serão apresentados ao longo deste capítulo, bem como o conjunto das variáveis calculadas e as equações que formarão os parâmetros do software implementado no desenvolvimento experimental descrito no capítulo seguinte.

4.2 Desenvolvimento da metodologia e dos algoritmos de falhas

As funções de transferência desenvolvidas nesta metodologia seguirão a lógica de leitura e processamento apresentados a seguir.

1. Leitura das variáveis de entrada exemplo V_{exc} e I_{exc} , etc;
2. Conversão das leituras das entradas para unidade de engenharia;
3. Definição das variáveis calculadas a partir dos dados de entrada, as quais receberão a nomenclatura da tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Variáveis calculadas a partir das variáveis de entrada

Variáveis calculadas	Descrição
V_r	Tensão no rotor do gerador
I_r	Corrente no rotor do gerador
Tr_{exc}	Temperatura no campo da excitatriz
Tr_g	Temperatura no rotor do gerador
R_{exc}	Resistência do campo da excitatriz
R_r	Resistência do rotor

4. Desenvolvimento dos cálculos envolvidos na metodologia proposta, segundo as equações de correspondência desenvolvidas para o diagnóstico das falhas monitoradas do gerador *brushless*.

As equações de correspondência serão modeladas de acordo com os dados obtidos através das medições de campo, dos dados levantados dos projeto dos geradores e segundo as teorias de eletromagnetismo envolvidas.

5. Aplicação das regras definidas na metodologia no software implantado no desenvolvimento experimental, as quais estão apresentadas na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Variáveis dos cálculos iniciais

Falhas defeitos	Regras	Mapeamentos
Falha no campo da excitatriz	Regras FCEXC	Curto entre espiras
		Curto entre os polos
		Falhas na conexão
		Sobret temperatura
Falha na ponte rotativa	Regras FEEXC	Rompimento de diodos
		Curto nos diodos
		Fuga a terra
Falha no rotor do gerador	FRGER	Falhas na conexão
		Curto entre espiras
		Curto entre os polos
		Fuga a terra
		Sobret temperatura
		Impregnação de sujeira

6. Geração de saídas físicas e virtuais (geração de alarmes e/ou avisos).

4.3 Levantamento da curva de saturação a vazio

A curva de saturação em vazio do gerador fornece as tensões induzidas em função dos ajustes na excitação *brushless* da máquina operando em vazio mantida sob rotação constante. A frente temos a tabela 8 e em seguida a sequência dos ensaios propostos para ser executado nos cinco geradores *brushless* monitorados pelo projeto:

Tabela 8 – Ensaio da curva de saturação à vazio dos geradores

Unid. Geradoras		Leituras		Cálculos				Curva Saturação	
		I _{exc} [A]	V _t [V]	I _{exc} [A]	Desvio [%]	Coef. "a"	Coef. "b"	I _{exc} [A]	V _t [V]
UG29	Ponto 1								
	Ponto 2								
	Ponto 3								
UG30	Ponto 1								
	Ponto 2								
	Ponto 3								
UG31	Ponto 1								
	Ponto 2								
	Ponto 3								
UG32	Ponto 1								
	Ponto 2								
	Ponto 3								
UG33	Ponto 1								
	Ponto 2								
	Ponto 3								

- Leitura da tensão terminal do gerador - V_t (fase-fase);
- Registrar cada valor de tensão terminal em cada passo de corrente de excitação - I_{exc} ;
- Não havendo problemas no circuito magnético, a relação V_t/I_{exc} deve manter um padrão sendo permitido pequenos desvios. Além dos dados de placa do gerador, esse padrão está relacionado às características do circuito magnético, tais como: número de espiras (rotor e estator), dimensões do núcleo magnético do estator (dente, coroa e comprimento, quantidade de espiras dos polos, tamanho do entreferro, n° de polos, etc.

- Caso essa relação desvie do padrão esperado, no algoritmo a ser desenvolvido, haverá uma análise de causa raiz do problema emitindo alerta aos gestores de falhas do sistema monitorado, por exemplo de queima de diodo da ponte retificadora, ou curto-circuito entre espiras etc.
- O desvio máximo do padrão esperado da relação $V_t \times I_{exc}$ será definido durante o comissionamento do sistema, mas não deverá exceder 5%. Em função das particularidades das máquinas e/ou empreendimento, esse valor poderá ser alterado para evitar indicação indevida de falhas ou tendência de problemas;
- Dentro da lógica, a grandeza do desvio será um dos direcionadores para a causa do eventual problema apresentado.
- A partir da obtenção dos 3 pontos, verificar a linearidade da reta, bem como a sua inclinação;
- A partir da inserção dos pontos no protocolo, obter os coeficientes angular e linear da equação;
- Com os coeficientes, será definida a equação de correspondência a partir do método de regressão linear;
- A equação linearizada será determinada e inserida como parâmetro no algoritmo do programa;
- Em condições normais, não é esperada uma saturação da resposta do sistema de excitação em valores até 1,1 pu de tensão durante o processo de magnetização. Assim sendo, caso ocorra a saturação, o levantamento da curva deverá ser reavaliado;

4.4 Levantamento da curva operacional do gerador sincronizado

A presente pesquisa prevê a calibragem da relação I_{exc} x MVA considerando a influência da carga no valor da potência reativa do gerador, portanto, serão testes de operação sincronizada, em seguida demonstramos a sequência dos ensaios operacionais propostos para os geradores *brushless* monitorados no projeto:

Tabela 9 – Levantamento da Curva Operacional com Gerador Sincronizado

		Leituras			Cálculos			Capabilidade		
Unid.	Geradoras	Iexc [A]	MVA	Vt1 [V]	MVA	Desvio [%]	Coef. "a"	Coef. "b"	Iexc [A]	Vt [V]
	Ponto 1									
UG29	Ponto 2									
	Ponto 3									
		Iexc [A]	MVA	Vt2 [V]	MVA	Desvio [%]	Coef. "a"	Coef. "b"	Iexc [A]	Vt [V]
	Ponto 1									
UG29	Ponto 2									
	Ponto 3									
		Iexc [A]	MVA	Vt3 [V]	MVA	Desvio [%]	Coef. "a"	Coef. "b"	Iexc [A]	Vt [V]
	Ponto 1									
UG29	Ponto 2									
	Ponto 3									

Conforme apresentado na tabela 9, foram definido três pontos de leitura para registro dos dados referente ao gerador n°29, devendo ser repetido o mesmo procedimento para os demais geradores monitorados no projeto (UGs 30 a 33), o que permitirá uma definição mais precisa da inclinação da reta correspondente ao perfil operacional dos mesmos.

- Realizar a leitura da potência aparente da máquina (MVA) nos bornes dos geradores;
- Para cada valor MVA é esperada uma determinada corrente de excitação para um determinado nível de tensão;
- Tensões mais elevadas, esperado valores maiores de Iexc para um determinado MVA;
- Tensões mais baixas, esperado valores maiores de Iexc para um determinado MVA;
- Assim sendo, para uma maior precisão dos diagnósticos da máquina em operação, o algoritmo desenvolvido considera equações distintas para diferentes faixas de tensão

terminal, de forma a considerar a influência da tensão sistêmica na geração de reativo da máquina;

- Não havendo problemas no gerador, a relação MVA/I_{exc} deve manter um padrão para cada faixa de tensão terminal, sendo permitidos pequenos desvios;
- Caso essa relação desvie do padrão esperado, conforme já consta no algoritmo desenvolvido, haverá uma análise de causa raiz do problema. Assim sendo, por exemplo, havendo um curto entre espiras do polo, a lógica detectará instantaneamente, ao passo que atualmente, sem o monitoramento, existe o risco de se operar em falha;
- O desvio máximo permitido será definido durante o comissionamento juntamente com os gestores de operação e manutenção da usina;
- Dentro da lógica, a grandeza do desvio será um dos direcionadores para a causa dos eventuais problemas monitorados.

4.5 Levantamento da temperatura do campo da excitatriz

A Tabela 10 apresentada a seguir registrará as leituras necessárias para os cálculos da resistência do enrolamento da excitatriz do gerador *brushless* n°29 e sua temperatura, devendo ser repetido o mesmo procedimento para os demais geradores monitorados no projeto (UGs 30 a 33).

Tabela 10 – Levantamento da resistência e temperatura do campo da excitatriz

		Leituras			Cálculos	
		I_{exc} [A]	V_{exc} [V]	$^{\circ}\text{C}$ Amb.	R_{exc} [Ω]	$^{\circ}\text{C}$ enr.
UG29	Ponto 1					
	Ponto 2					
	Ponto 3					

4.6 Equacionamento Matemático – Algoritmos de Programação

A tensão de excitação (V_{exc}) é comandada pelo Regulador de Tensão (RT) resultando em uma corrente de excitação (I_{exc}) linearmente dependente da resistência do campo da excitatriz. A resistência do rotor da excitatriz é um valor de projeto, medido e definido para uma temperatura de 40°C para fins de cálculo e definição de perdas. Trata-se de uma característica intrínseca ao projeto que depende, basicamente, da seção e comprimento das espiras. Assim, o ponto de partida para os respectivos cálculos será o valor de projeto definido para 40°C, o qual poderá ser aferido através de medições de campo.

$$I_{exc} = f(V_{exc}, R_{exc}) \rightarrow I_{exc} = \frac{V_{exc}}{R_{exc}}$$

A corrente de excitação produz um fluxo magnético (Φ_{exc}) que induz uma tensão alternada no rotor da excitatriz (Lind), a qual é retificada e aplicada ao rotor do gerador (V_r).

$$V_r = f(I_{exc})$$

A tensão DC aplicada no rotor (V_r) produz uma corrente no rotor do gerador (I_r) que é linearmente dependente da resistência do rotor. A resistência do rotor do gerador é um valor de projeto, medido e definido para uma temperatura de 40°C para fins de cálculo e definição de perdas.

$$I_r = f(V_r, R_r) \rightarrow I_r = \frac{V_r}{R_r}$$

De um modo geral, a corrente do rotor reflete diretamente no módulo da tensão terminal do gerador (V_t), que por sua vez influencia na potência reativa trocada com a rede. Com o gerador em vazio, a corrente no rotor age linearmente no módulo da tensão terminal, seguindo o perfil conhecido da curva de saturação em vazio.

$$S = f(P, Q) \rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Assim, na modelagem, a potência aparente do gerador é dependente da potência ativa, da corrente do rotor do gerador, das tensões de saída do gerador e da tensão do sistema.

$$S = f(P, I_r, V_t, V_s)$$

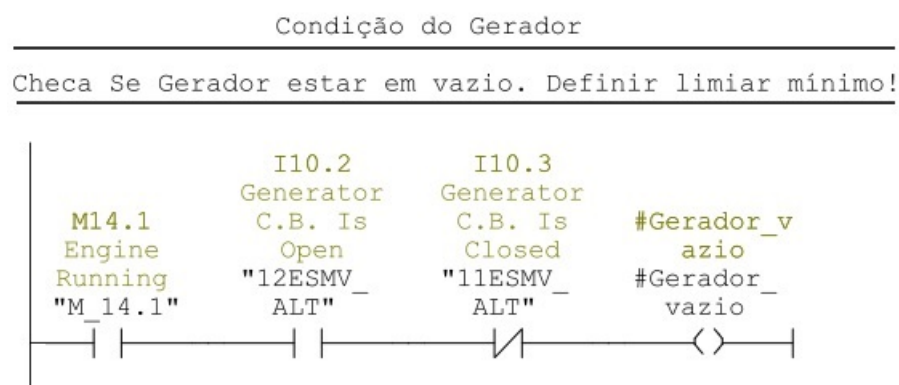
4.7 Modelagem para o mapeamento de falhas no Sistema de Excitação

Nesta etapa deu-se o início da modelagem de possíveis falhas no Sistema de excitação. O sistema proposto deverá ao final de sua implantação, ser capaz de monitorar os seguintes elementos dos grupos geradores:

- Monitoramento da operação em vazio do gerador
- Monitoramento de falha no processo de magnetização;
- Monitoramento de temperatura elevada e crítica no enrolamento do campo da excitatriz;
- Monitoramento de falhas de conexão nos enrolamentos da excitatriz;
- Curto-circuito entre espiras dos polos da excitatriz e do gerador;
- Verificação de desequilíbrio entre as fases do gerador;
- Monitoramento de falhas na ponte retificadora rotativa;
- Curto-circuito entre espiras dos polos do gerador;
- Desvio operacional em relação às curvas características.

4.8 Monitoramento da condição em vazio do gerador

Figura 29 – Lógica implementada para verificação de gerador em vazio



No processo de magnetização do gerador, as condições listadas a seguir são necessárias para garantir sua condição de operação em vazio, conforme lógica da fig:29 acima:

- Máquina primária $\geq 90\%$ da rotação nominal;

- Disjuntor principal do gerador na posição desligado;
- Intertravamento do disjuntor principal do gerador desligado na posição fechado.

4.9 Monitoramento de falha de magnetização do gerador

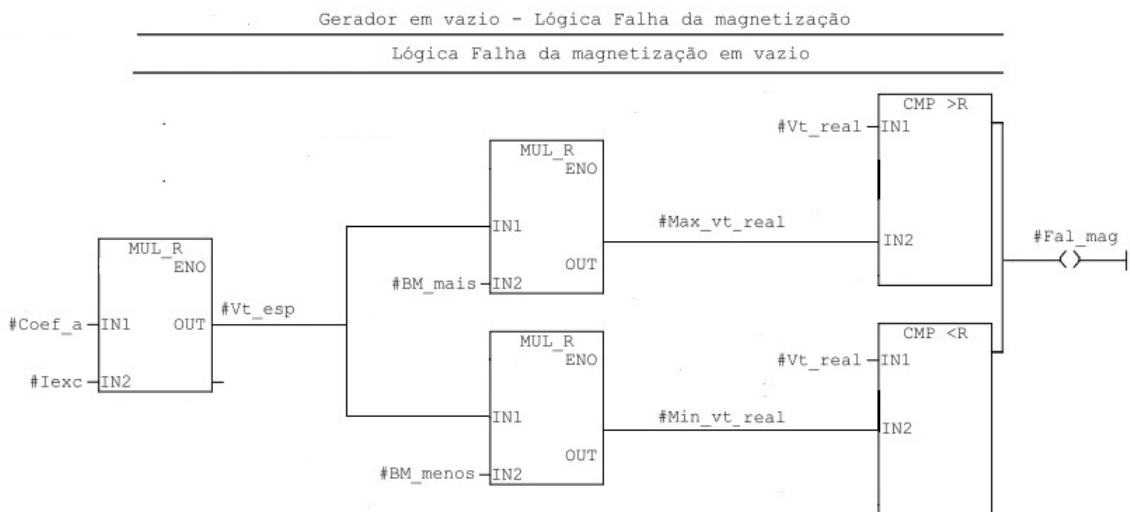
Na condição para máquina em vazio, $MW = 0$, para cada valor de corrente de excitação lida I_{exc} , será calculado o valor de tensão terminal esperada V_t' , através da seguinte equação:

$$V_t' = k \cdot I_{exc}$$

O valor da constante k será definido nos ensaios à vazio de cada gerador, e corresponde ao coeficiente angular da reta que define a característica do entreferro de cada um destes geradores. Este coeficiente será uma variável parametrizável na tela da IHM de configuração, presente no desenvolvimento experimental.

O valor da tensão terminal esperada V_t' calculada por $k \cdot I_{exc}$ será somada a uma banda morta superior e inferior ($V_t' = V_t' \pm BM$). Esta banda morta será inicialmente definida em $\pm 10\%$ e substituirá o coeficiente linear da curva característica linearizada dos geradores, dado que os polos dos geradores apresentam a característica de reter parte da força eletromotriz induzida mesmo após sua desenergização (tensões remanescentes). Esta tensão calculada será comparada à tensão terminal em tempo-real do gerador para determinação de falha no circuito de magnetização, conforme o algoritmo apresentado na figura 30:

Figura 30 – Lógica de verificação de falha de magnetização em vazio



Caso o valor lido em tempo-real da tensão terminal V_t encontrar-se fora do valor da tensão terminal esperada V_t , o sistema de monitoramento e diagnóstico gerará a seguinte mensagem: “Falha na Magnetização do gerador em vazio”.

Após este diagnóstico da falha de magnetização do gerador em vazio, dar-se-á o levantamento das possíveis causas da referida falha começando por avaliar problemas no campo da excitatriz, como temperatura elevada e/ou temperatura crítica dos seus enrolamentos devidos a curto-circuitos entre espiras e nos polos.

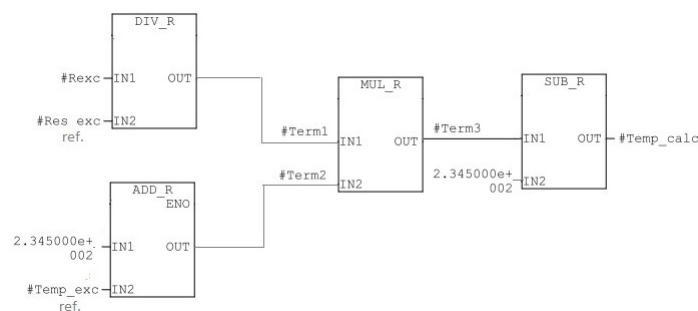
4.10 Monitoramento da temperatura do campo da excitatriz

O cálculo da temperatura do enrolamento da excitatriz será determinado a partir da equação 4.1:

$$T_{calc} = \frac{R_{medida}}{R_{ref}} \times (234,5 + T_{ref}) - 234,5 \quad (4.1)$$

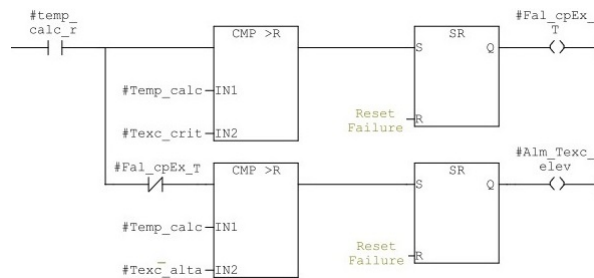
As variáveis de resistência de referência, R_{ref} e temperatura de referência T_{ref} serão determinadas durante os ensaios de cada gerador *brushless* monitorado da usina, e seus valores configurados na tela de IHM do desenvolvimento experimental. Haverá também a parametrização de limites de temperatura caracterizados como temperatura alta e temperatura crítica dos enrolamentos de campo. A figura 31 apresenta a lógica de verificação de falha de sobretemperatura no campo da excitatriz.

Figura 31 – Lógica de verificação de falha de sobretemperatura no campo da excitatriz



Caso a temperatura da excitatriz esteja acima do valor limite estabelecido de temperatura elevada (ex.: 100°C) o sistema desenvolvido deverá emitir um alarme de temperatura da excitatriz elevada, e caso o valor da temperatura da excitatriz ultrapasse o limite estabelecido como temperatura crítica (ex.: 105°C), o sistema deverá registrar o diagnóstico de temperatura crítica da excitatriz. A lógica desta avaliação está apresentada na figura 32

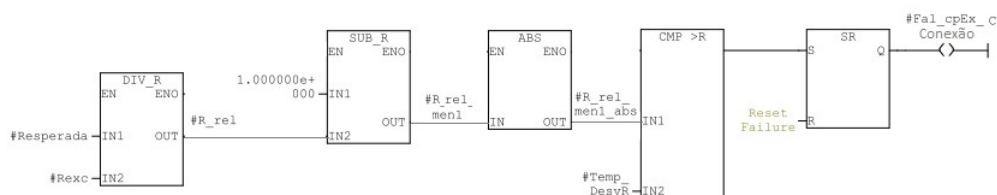
Figura 32 – Lógica de diagnóstico e alarme de temperatura elevada e temperatura crítica no campo da excitatriz



4.11 Monitoramento de conexões no campo da excitatriz

O monitoramento do diagnóstico de falha nas conexões dos enrolamentos da excitatriz se dará pela comparação percentual entre sua resistência medida em tempo-real, comparada à resistência esperada, medida nos ensaios dos geradores, e com variação determinada em função da sua temperatura. Quando esta diferença for maior do que um limite definido na IHM do desenvolvimento experimental (ex.:5%), a falha será diagnosticada.

Figura 33 – Lógica de diagnóstico de falha de conexões no campo da excitatriz



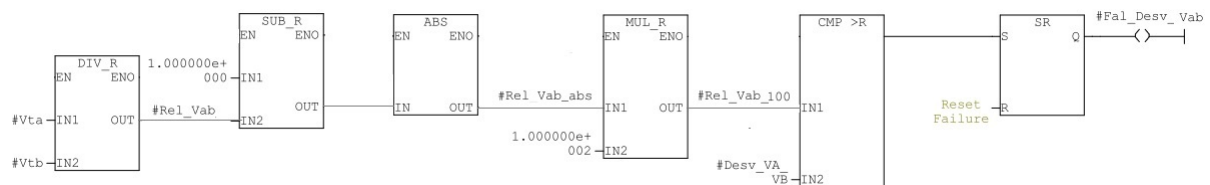
4.12 Monitoramento de curto-circuito entre espiras dos polos da excitatriz

Considerando que os polos são formados por um grupo de bobinas interligadas entre si, e que há uma relação entre o valor da força eletromotriz induzida e o número de espiras, $E = N \times I$, um curto-circuito presente entre as espiras de um polo da excitatriz refletirá diretamente nesta relação, e será propagado para os estágios seguintes, passando pela ponte retificadora, diminuindo a tensão de excitação V_r entregue ao campo principal do gerador, a qual terá uma menor corrente de excitação I_r , fazendo com que a tensão terminal daquela fase V_ϕ (com polo(s) em curto-circuito) tenha seu módulo diminuído em relação as outras duas fases. Assim, um curto-circuito entre espiras pertencentes a um polo de uma fase afetará a tensão terminal desta mesma fase, e caso tal desequilíbrio se registre no processo de magnetização, esta possibilidade deve ser considerada numa primeira investigação da causa.

4.13 Monitoramento de desequilíbrio entre fases do gerador

O desequilíbrio dos módulos entre as fases do gerador *brushless* será monitorado em tempo-real no projeto, considerando o desequilíbrio entre as fases V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} . A lógica desenvolvida para o desequilíbrio entre os módulos das fases V_{AB} está demonstrada na figura 34, sendo que no desenvolvimento experimental deverá ser parametrizado o limite deste desvio em termos percentuais para as três fases, a partir dos quais serão emitidos os diagnósticos de falhas desta natureza.

Figura 34 – Lógica de diagnóstico de falha de desvio de tensão entre as fases



4.14 Monitoramento de curto-circuito entre espiras nos polos do gerador

Semelhante ao fenômeno apresentado no caso de curto-circuito entre espiras de um polo da excitatriz, a ocorrência de curto-circuito presente entre as espiras de um dos polos do enrolamento de campo do gerador refletirá diretamente na relação $E = N \times I$, e diminuirá, na fase a qual o polo em curto-circuito pertença, uma diminuição da tensão induzida naquela fase da armadura, fazendo com que a mesma tenha seu módulo diminuído em relação as outras duas fases. Assim, um curto-circuito entre espiras pertencentes a um polo no campo do gerador registrará um desequilíbrio de fases que deverá ser investigada à luz do diagnóstico deste tipo de defeito nos seus polos.

4.15 Monitoramento de falhas no gerador sincronizado

Similar ao processo de detecção de falhas na magnetização, a análise de falhas do gerador sincronizado será realizada através de comparação de valores reais de MVA com valores teóricos definidos por equações de correlação, as quais serão inseridas na tela de parametrização do software (coeficiente angular "a" e coeficiente linear "b"). Para a comparação será realizado o seguinte processo:

- Para cada valor de potência aparente - MVA lido, deverá ser calculado o valor da corrente de excitação - I_{exc} esperado. Esse valor esperado será obtido através da

equação linearizada desenvolvida a partir dos ensaios com o gerador sincronizado em pontos operacionais, conforme registrado na tabela 9 já apresentada, a qual equação será parametrizada em tela de IHM específica, no desenvolvimento experimental do projeto, com possibilidade de ajustes futuros pelos próprios gestores da usina melhorando a performance do projeto.

- A lógica de programação implementada no PLC verificará a relação entre as grandezas MVA e I_{exc} , e, como elas dependem da tensão do gerador (V_t), após captura e armazenamento desta variável pelo sistema, a lógica desenvolvida no PLC fará a escolha de uma entre três curvas linearizadas previamente a partir dos ensaios que serão realizados nos cinco geradores monitorados, conforme já apresentado na tabela 9.
- O módulo da referencia de tensão, ou seja, a tensão terminal do gerador (V_t) determinará qual entre os três conjuntos de parâmetros "a"(coeficiente angular) e "b"(coeficiente linear) serão escolhidos para a definição da equação do comportamento operacional do gerador no processo de comparação entre a I_{exc} esperada e I_{exc} real medida.
- A seleção que definirá a equação será utilizada é definida segundo os critérios descritos abaixo.
 1. Eq 1 – para $V_t > 14.150$ volts
 2. Eq 2 – para $13.450 < V_t < 14.150$ volts
 3. Eq 3 – para $V_t < 13.450$ volts
- Todas as equações são de primeiro grau ou seja $Y = aX + b$, onde:
 1. Os valores de "a" e "b" são os coeficientes que serão configurados na parametrização do sistema desenvolvido;
 2. "X" é a potência aparente calculada MVA ;
 3. "Y" é a I_{exc} esperada.

4.16 Monitoramento de falha na ponte retificadora rotativa

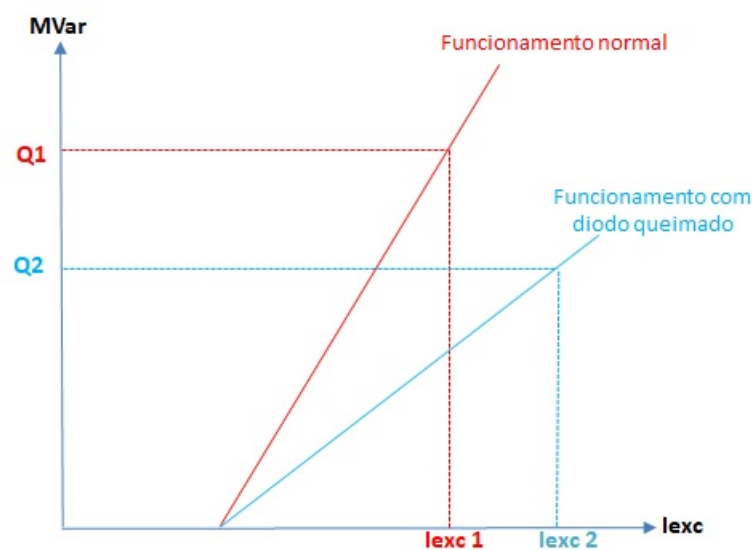
A ponte retificadora trifásica rotativa, acoplada no eixo do gerador, é responsável pela retificação da força eletromotriz induzida na armadura da excitatriz auxiliar. O sinal retificado será a referência de tensão para a excitação do circuito de campo do gerador

principal. Na grande maioria dos casos os defeitos nos diodos da ponte rotativa são caracterizados por uma interrupção na circulação de corrente (diodos abertos), as análises de defeito na ponte rotativa na metodologia proposta retrata esta condição.

Em condições normais de operação, estando o sistema corretamente modelado a partir da sua Curva a vazio - CAV, é possível determinar a característica do entreferro da máquina síncrona e por regressão linear determinar o modelo matemático da relação $V_t \times I_{exc}$ ou $MVA \times I_{exc}$. Desta forma, qualquer valor verificado em tempo-real nesta relação, que se encontre num patamar acima de um limite pré-determinado, por exemplo 5%, poderá ser tratado como falha envolvendo a ponte de diodos ou o estator da excitatriz.

A ocorrência de um defeito de abertura em um ou mais diodos da ponte rotativa resultará na alteração do valor médio da tensão contínua aplicada aos enrolamentos de campo do gerador principal, conseqüentemente alterando sua corrente de excitação. Nesta condição, o regulador de tensão, na sua malha fechada de controle buscará responder com um aumento de tensão de excitação na entrada da excitatriz auxiliar para conseqüentemente elevar a corrente de excitação do campo do gerador principal, buscando corrigir o valor da tensão ou potência reativa na saída do gerador para aquela condição antes da falha. Este aumento da corrente de excitação afetará o resultado da entrega de potência reativa ao sistema disparando o alarme de possível falha no sistema de retificação. O defeito é detectado porque para uma dada I_{exc} , é esperado uma V_t , com um grau de desvio já considerado no cálculo e implementado no algoritmo de detecção da falha.

Figura 35 – Simulação de acréscimo de corrente para compensar falhas na ponte retificadora rotativa *brushless*



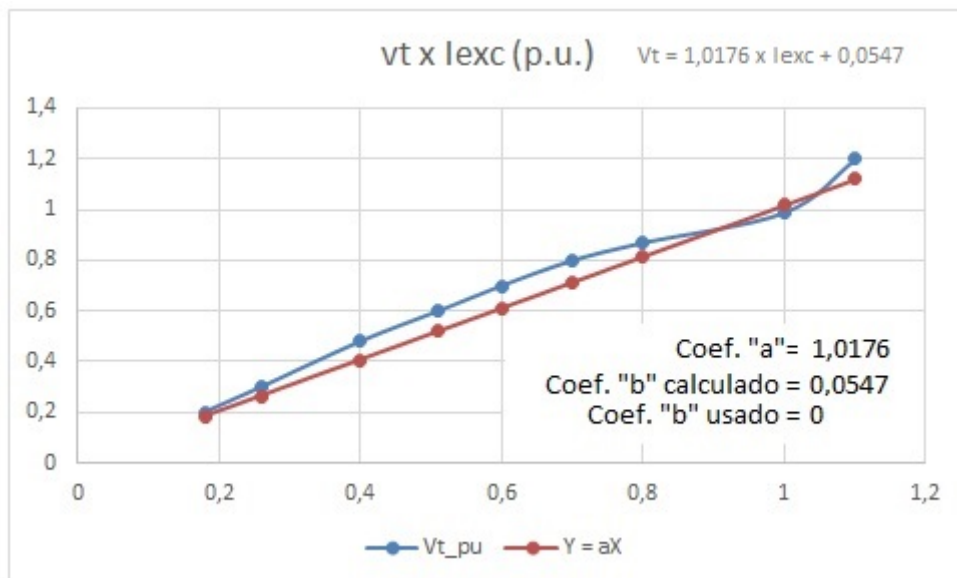
5 Desenvolvimento experimental

A metodologia aqui apresentada tem como objetivo também validar suas proposições através de um desenvolvimento experimental, composto por telas de interfaces homem-máquina com recursos para que os próprios gestores da operação e manutenção da usina possam aplicar ajustes e parametrizações das variáveis definidas nos algoritmos desenvolvidos na metodologia da pesquisa, melhorando estes ajustes para condições operacionais não exploradas exaustivamente nos geradores monitorados pelo desenvolvimento experimental instalado na usina.

As grandezas para o monitoramento e diagnósticos das falhas foram inicialmente programadas em linguagem *ladder* e inseridas num PLC da rede operacional da usina, ensaios operacionais de campo estão aqui representados, bem como os resultados apresentados (14) (15) (16).

Foram previstos ensaios operacionais à vazio no gerador *brushless* nº 29, porém, os valores apresentados na figura 36, curva linearizada em P.U., teve como origem as curvas em vazio e em curto-circuito informada pelo fabricante:

Figura 36 – Curva linearizada $V_t \times I_{exc}$ do grupo gerador nº 29

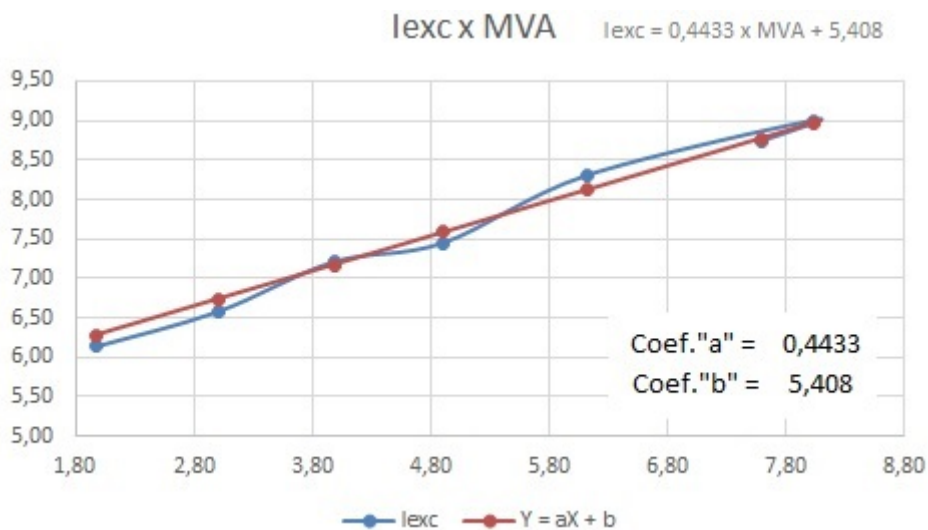


A figura 39 apresenta os resultados dos ensaios operacionais realizados no gerador *brushless* nº 30, apresentado em (17), enquanto que a figura 40 apresenta sua curva linearizada:

Figura 39 – Protocolo de ensaios operacionais do grupo gerador nº 30

Medições/Leituras															
Sistema		Gerador						Excitação - RT		Ambiente	Grupo	FP	P(AVR) [MW]	P(Fat) [MW]	Horário
AT	MT	Iestator	P	Q	[°C]	[°C]	Uexc	Iexc	Temp amb	Grupo					
[kV]	[kV]	[A]	[MW]	[Mvar]	estator	mancal	[V]	[A]	[°C]	[MW]					
UG 30	227,2	13,8	325	7,5	1,18	85	61,5	63	8,73	37,1	44,17	0,99	7,8	7,3	15:30
	228,2	13,8	342	8	0,81	88	61,5	65,7	9	37,1	43,7	1	7,95	8,2	15:40
	228,2	13,8	262	6	1,18	87	61,5	60	8,3	37,1	41,4	0,98	6,1	6	15:50
	228,2	13,8	209	4,84	0,81	83	61,5	55	7,45	37,1	39,9	0,99	5,06	5	15:55
	229,3	13,9	166	3,9	0,81	79	61,6	52	7,21	37,1	39,5	0,98	4,05	3,9	16:00
	229,3	13,9	125	2,96	0,5	75	61,6	47,5	6,58	37,1	38,86	1	3,04	3	16:10
	229,3	13,9	83	1,96	0,25	75	62	44	6,14	37,1	37,63	1	1,83	2	16:20
	229,3	13,9	48	1	0,56	68	62	44,1	6,15	37,1	31,4	0,82	0,7	1	16:30

Figura 40 – Curva linearizada $MVA \times I_{exc}$ do grupo gerador nº 30

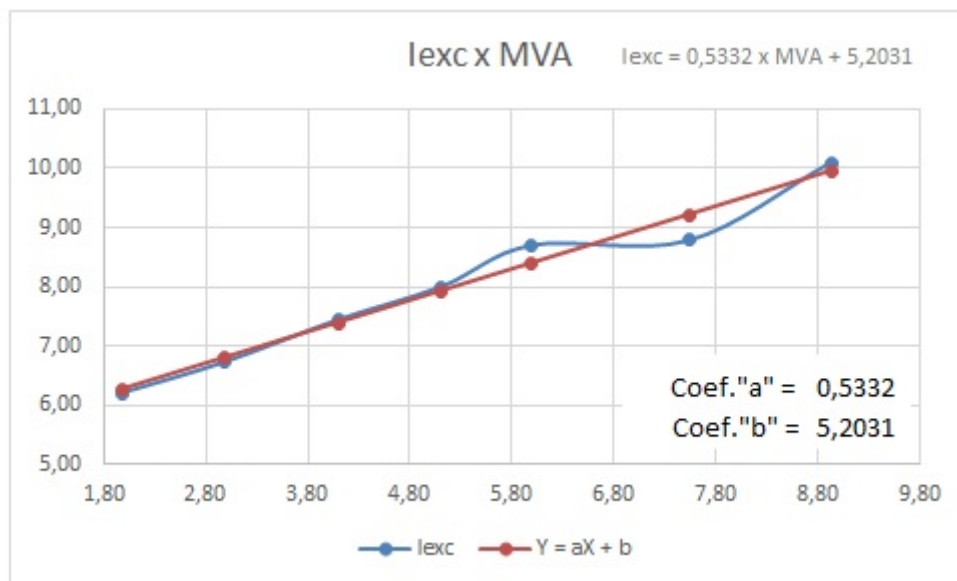


A figura 41 apresenta os resultados dos ensaios operacionais realizados no gerador *brushless* nº 31, apresentado em (17), enquanto que a figura 42 apresenta sua curva linearizada:

Figura 41 – Protocolo de ensaios operacionais do grupo gerador nº 31

Local:	UTE EPASA		MW	8,76	FP	0,8	kV] nominal	13,8	Rotação	720	[V] campo	150	[A] campo	14	
Planta	Termonordeste		Fabricante	Hyundai		N° de série		Data		21/11/2013					
Medições/Leituras															
Sistema		Gerador					Excitação - RT		Ambiente	Grupo					
AT	MT	Iestator	P	Q	[°C]	[°C]	Uexc	Iexc	Temp amb	Grupo	FP	P(AVR)	P(Fat)	Horário	
[kV]	[kV]	[A]	[MW]	[Mvar]	estator	mancal	[V]	[A]	[°C]	[MW]		[MW]	[MW]		
227,9	13,6		7,9	1,8			73	10			0,975				
226,8	13,6		6,9	1,65			69	9,58			0,9726				
226,8	13,6		5,3	1,4			65	8,7			0,9668				
226,8	13,58		4	1,57			59	8,3			0,9309				
226,8	13,54		3	1,45			56	7,7			0,93				
225,7	13,49		0,8	1,18			50	6,2			0,62				
UG 31	225,7														

Figura 42 – Curva linearizada $MVA \times I_{exc}$ do grupo gerador nº 31



5.1 Telas desenvolvidas no projeto de pesquisa

Esta sessão apresentará os resultados das telas desenvolvidas pela EPASA para suporte aos operadores e gestores da operação e manutenção das usinas para o gerenciamento do projeto de pesquisa.

5.1.1 Planta do gerador brushless acoplado à máquina primária

A figura 47 é amostra da tela do gerador nº29 onde se apresenta em destaque a máquina primária em vista de planta, juntamente com o referido gerador acoplado ao seu eixo.

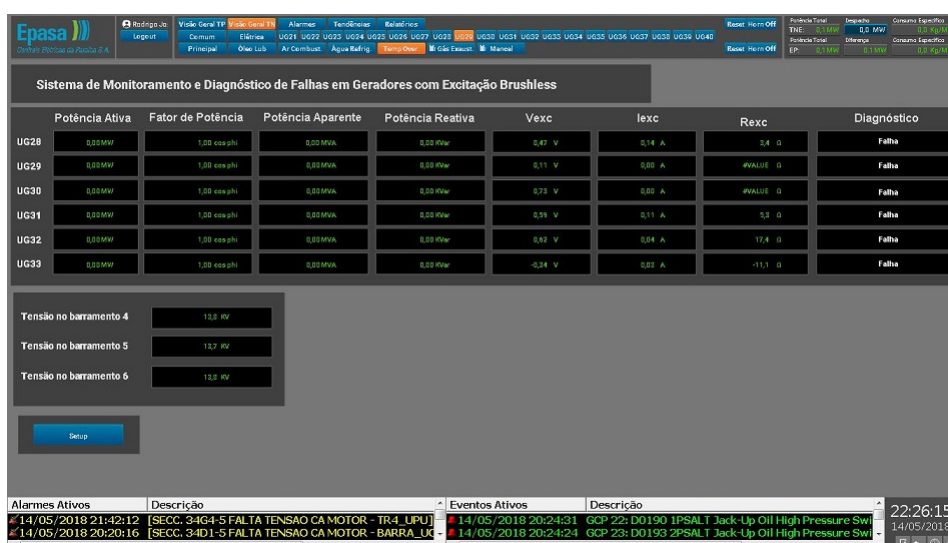
Figura 47 – IHM do gerador *brushless* número 29 com a máquina primária



5.1.2 IHM com as grandezas monitoradas no projeto de pesquisa

A figura 48 é amostra da tela de IHM com as grandezas monitoradas do projeto.

Figura 48 – IHM com as grandezas monitoradas no projeto



5.1.3 ajuste das constantes do sistema

A figura 49 é amostra da tela de IHM para a realização de ajustes dos parâmetros e constantes do projeto.

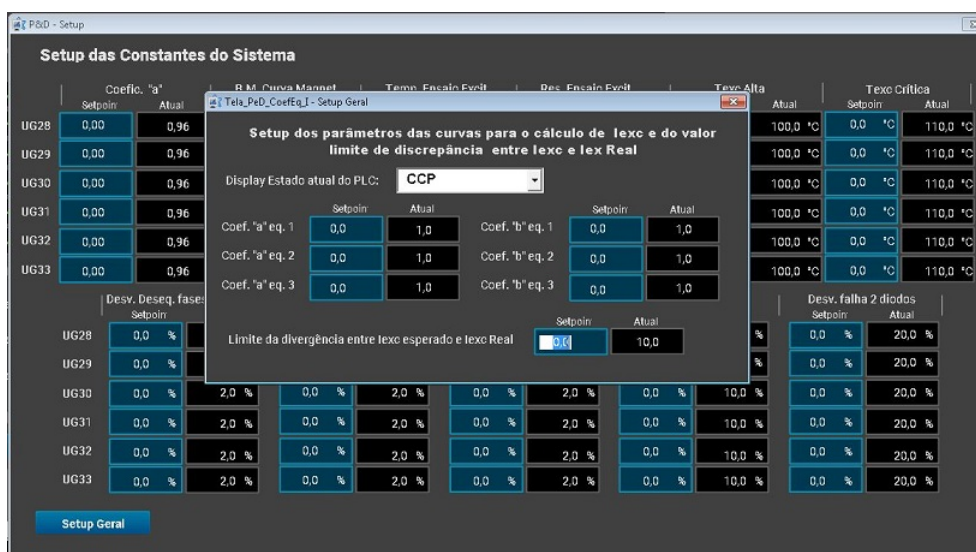
Figura 49 – IHM de ajustes das constantes do projeto de pesquisa por grupo



5.1.4 Setup das curvas para o cálculo de I_{exc}

A figura 50 é amostra da tela de IHM de ajustes de parametrização do cálculo da corrente de excitação - I_{exc} .

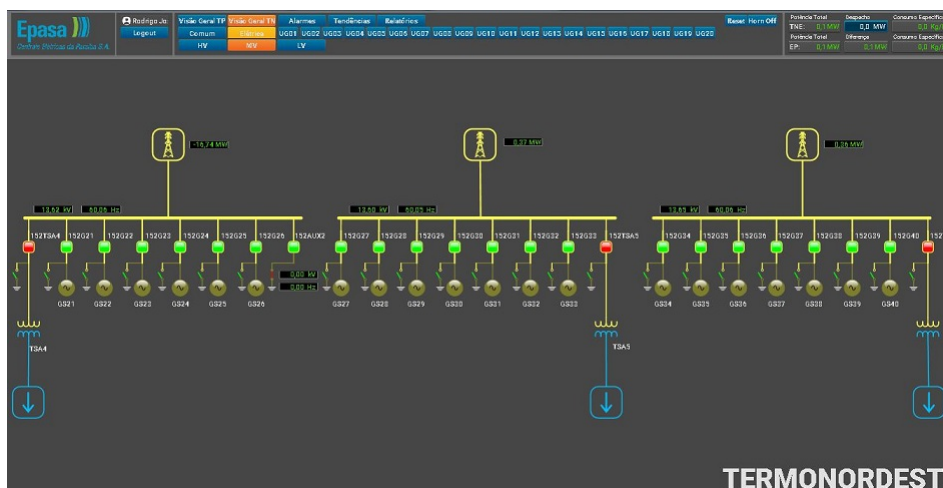
Figura 50 – IHM de ajustes dos parâmetros das curvas para o cálculo de I_{exc}



5.1.5 Tela das interligações em 13.8 kV dos geradores *brushless*

A figura 51 é amostra da tela de IHM do barramento de 13,8 kV e o estado operacional dos geradores *brushless* da UTE Termonordeste da EPASA.

Figura 51 – Tela do lado de 13.8 kV dos geradores *brushless*



5.1.6 Tela de acompanhamento de tendência e limites de alarmes

A figura 52 é amostra da tela de IHM para acompanhamento das curvas de tendência e limites de alarmes das grandezas monitoradas no projeto.

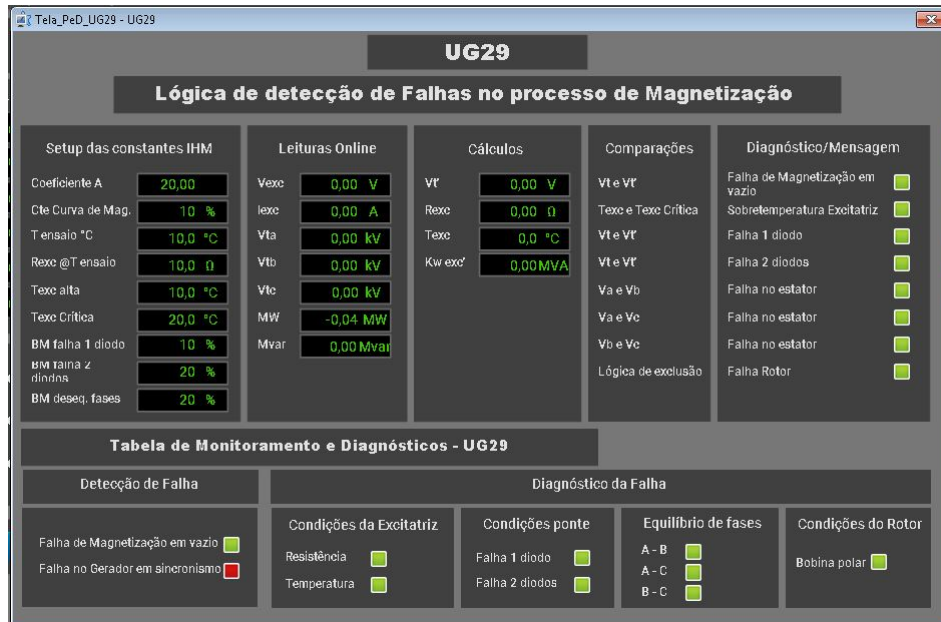
Figura 52 – Tela de acompanhamento de tendências e limite de alarmes



5.1.7 Tela de lógica de detecção de falhas no processo de magnetização

A figura 53 é amostra da tela de IHM da lógica desenvolvida no projeto para acompanhamento do processo de magnetização dos geradores monitorados.

Figura 53 – Tela de lógica de detecção de falhas no processo de magnetização



6 Conclusão e recomendações

Em geradores de energia rotativos, o sistema de excitação é considerado um elemento fundamental no processo de conversão de energia. O sistema de excitação conhecido como *brushless* mostra-se economicamente competitivo para usinas térmicas que atendem próximas aos centros de carga. Os custos de manutenção de ativos de geração são igualmente considerados muito relevantes no processo de aquisições ou participações em leilões de energia, de forma que ferramentas apropriadas para o monitoramento dos principais e mais caros elementos destes ativos de geração, no caso o rotor deste tipo de geradores, sejam interessantes do ponto de vista dos investidores. Diagnóstico em tempo-real é o estado da arte, no que se refere a gestão de ativos. Esta dissertação apresentou um sistema eficiente de monitoramento e diagnóstico, a qual permitirá confiabilidade ao planejamento da manutenção de intervir preventivamente, evitando danos que, geralmente, resultam em longos períodos de indisponibilidade.

O monitoramento e diagnósticos de falhas em geradores com sistema de excitação brushless contemplou um desenvolvimento experimental, o qual encontra-se instalado supervisionando um grupo de cinco geradores com excitação brushless da UTE EPASA.

Esta UTE conta com um conjunto de quarenta geradores com estas mesmas características, contabilizando 370 MW de potência instalada e está conectada na rede básica (230 kV), na região nordeste do país. O trabalho, em foco e aqui exposto, permitirá os seguintes benefícios na operação e manutenção dos geradores com excitação brushless:

- Realizar análise das condições operacionais, baseada em curvas de tendência de falha;
- Favorecer ações preventivas, contribuindo para a programação da manutenção;
- Reduzir o risco de indisponibilidade não programada do gerador;
- Reduzir os custos inerentes às manutenções corretivas;
- Monitorar, em tempo real, as condições do gerador, inclusive, as bobinas polares;
- Executar autodiagnóstico pré-operacional, avaliando as condições da unidade geradora antes do seu sincronismo no SIN.

Para chegar no resultado esperado, a dissertação incluiu um levantamento da literatura sobre geradores *brushless*, o levantamento das características em vazio e em operação dos geradores por meio de ensaios, o desenvolvimento e a modelagem das características

do entreferro das máquinas, um acompanhamento do funcionamento das unidades geradoras comparando as grandezas monitoradas com as suas condições limites de projeto, permitindo assim, uma avaliação inédita de análise em tempo-real das condições do gerador. Espera-se, como resultado, contribuir para a manutenção da vida útil operacional destes geradores. As grandezas elétricas monitoradas para atender ao propósito do projeto foram:

- Tensão terminal do gerador
- Corrente de excitação do gerador
- Temperatura no campo da excitatriz
- Temperatura no rotor do gerador
- Resistência do campo da excitatriz
- Resistência do rotor

Conforme já mencionado neste trabalho, paralelamente aos estudos de modelagem, foram realizados os estudos de mapeamento de falhas dos geradores, os quais serão fundamentados nas curvas características obtidas em campo associadas às curvas reais esperadas para os mesmos. Dentro deste contexto, estão apresentadas as tabelas contendo as variáveis utilizadas nas equações e lógicas desenvolvidas para o algoritmo implementado no software embarcado no PLC de monitoração do sistema. Consideramos este trabalho relevante do ponto de vista técnico porque contribuirá para o efetivo monitoramento de geradores de energia que utilizam sistemas de excitação *brushless*, que são largamente utilizados tanto em pequenas centrais hidrelétricas quanto em usinas térmicas de grande porte. Do ponto de vista econômico, o projeto contribuirá para a diminuição dos custos da manutenção devido ao monitoramento contínuo dos geradores brushless, capacitando aos planejadores da manutenção intervir preventivamente.

Como próximos passos para esta pesquisa sugerimos estender os ensaios operacionais nos geradores com vistas a ganho de confiabilidade na determinação de falhas apresentadas pela metodologia. Poder-se-ia fazer uso de algoritmos de inteligência artificial, por exemplo, para as correlações entre as variáveis em cada ponto operacional do gerador *brushless* considerando sua curva de capacidade, no atendimento a diferentes tipos de cargas, operando isoladamente e em conjunto.

ANEXO A – Artigo publicado



XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

FI/GMI/13
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XII

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO – GMI

SISTEMA DE MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM GERADORES COM SISTEMA DE EXCITAÇÃO BRUSHLESS

Mario Marcio Torres(*) **Délvio F. Bernardes** **José G. Beffa** **Marcelo A. R. Junior** **Marcelo Y. Kurokawa**
CPFL GERAÇÃO **SD SOLUÇÕES** **SD SOLUÇÕES** **EPASA S.A.** **CPFL GERAÇÃO**

RESUMO

Em geradores de energia rotativos, o sistema de excitação é parte fundamental. Dentre os modos de acoplamento e controle dos sistemas de excitação encontram-se os sistemas brushless. No mercado não existem ferramentas apropriadas para o monitoramento do rotor de geradores com este tipo de excitação e, com isso, é rotineiro observar-se a queima de pólos, curto-circuitos nos enrolamentos e deficiências operacionais no suprimento de potência. Neste cenário, este trabalho apresenta um sistema eficiente de monitoramento e diagnóstico, uma vez que permite o planejamento da manutenção intervir a tempo, evitando danos que, geralmente, resultam em longos períodos de indisponibilidade.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador de energia, Excitação *Brushless*, Diagnóstico de rotores, Ponte rotativa, Acoplamento magnético.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os empreendimentos de geração termelétrica emergenciais sofreram uma alteração significativa no seu volume de despacho, dado às restrições hidrológicas e aos atrasos na entrada em operação de novos empreendimentos de geração e transmissão. Este cenário demanda um ajuste aos planos de manutenção destas UTEs, de modo a garantir a disponibilidade e confiabilidade energética ao Sistema Interligado Nacional.

Investigações realizadas recentemente indicaram não haver disponibilidade de ferramentas comerciais apropriadas para o monitoramento e diagnóstico do rotor de geradores com este tipo de excitação. Considerando o fato destas máquinas não possuírem alimentação direta dos seus pólos, mas sim através de um acoplamento magnético, caracteriza-se assim a dificuldade de obter-se informações relevantes de seu campo, tais como a corrente de excitação e a temperatura de operação. Por causa desta ausência de monitoramento de grandezas do campo, diversas são as consequências danosas que podem ocorrer e que dificilmente são apontadas precocemente em tempo hábil, de modo a permitir uma intervenção prévia. Dentre outras falhas, podem ser destacadas o curto-circuito entre espiras de um mesmo polo, a conexão defeituosa entre os polos e as deficiências operacionais que interferem na capacidade de fornecimento de potência. Estas falhas, quando não detetadas, geralmente culminam com a queima de polos, dano que resulta em indisponibilidade prolongada da máquina.

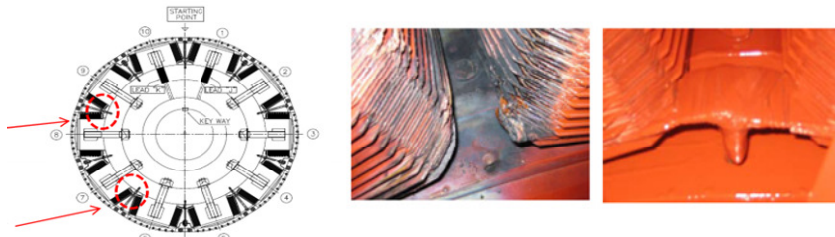


FIGURA 1 – Amostra de queima de polos

(*) Av. Benedito Castilho de Andrade, n° 1007 – apto. 121 - Bloco 13 – CEP 13.212-070 Jundiá, SP, – Brasil.
Tel: (+55 19) 3756-6429 – Fax: (+55 19) 3756-6463 – Email: mmtorres@cpfl.com.br

O presente trabalho apresenta a proposta de um P&D em andamento, cujos principais objetivos são: monitorar o funcionamento e realizar diagnósticos de falhas em geradores com sistema de excitação brushless. Este Projeto é vinculado ao programa de P&D desenvolvido para o setor elétrico e regulamentado pela ANEEL. O trabalho contempla um desenvolvimento experimental, que se encontra instalado supervisionando um grupo de cinco geradores com excitação brushless numa UTE da EPASA. Este agente de geração conta com um conjunto de quarenta geradores com estas mesmas características, contabilizando 370 MW de potência instalada e está conectada na rede básica (230 kV), na região nordeste do país.

O referido trabalho de P&D permite monitorar grandezas e diagnosticar eventuais falhas, auferindo os seguintes benefícios diretos na operação e manutenção dos geradores com excitação brushless:

- Realizar análise preditiva das condições operacionais, baseada em curvas de tendência de falha;
- Favorecer ações preventivas, contribuindo para a programação da manutenção;
- Reduzir o risco de indisponibilidade não programada do gerador;
- Reduzir os custos inerentes às manutenções corretivas;
- Monitorar, em tempo real, as condições do gerador, inclusive, as bobinas polares;
- Executar autodiagnóstico pré-operacional avaliando as condições da unidade geradora antes do seu sincronismo no SIN.

2.0 - METODOLOGIA

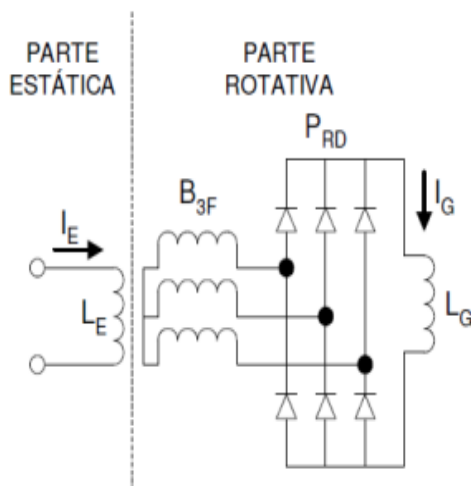
Para chegar ao resultado esperado, a pesquisa do projeto incluiu a realização de uma busca na literatura por soluções semelhantes que já houvessem sido utilizadas, o levantamento das características operacionais dos geradores através de ensaios realizados em campo, o desenvolvimento da análise matemática nas condições operacionais e a modelagem das máquinas, assim como o acompanhamento do funcionamento das unidades geradoras com o intuito de comparar as grandezas monitoradas com as suas condições limites de projeto, permitindo, desta forma, uma avaliação inédita da análise em tempo-real das condições do gerador. Contribuir para o aumento da vida útil operacional destes geradores e reduzir o tempo de indisponibilidade de máquina são resultados esperados deste trabalho de P&D.

2.1 - Análise do Sistema de Excitação dos Geradores da UTE

O sistema de excitação dos geradores da EPASA é do tipo *Brushless* que, quando comparado ao sistema de excitação convencional, possui como principal vantagem a inexistência dos problemas causados por anéis coletores e escovas para a alimentação do campo do gerador.

De modo análogo a um gerador síncrono com excitação convencional, em máquinas com excitação *brushless*, o fluxo magnético principal é resultado da circulação de corrente contínua através das espiras das bobinas dos pólos. Este fluxo magnético associado ao movimento de giro imposto ao eixo do gerador, e ainda considerando-se a geometria dos enrolamentos do estator, dão origem à indução de três tensões defasadas eletricamente de 120°. No entanto, neste tipo de excitação, os anéis e escovas puderam ser eliminados por ter sido desenvolvido um sistema de excitação que produz corrente contínua através de dispositivo acoplado ao eixo do gerador principal. Esse dispositivo, a partir de polos magnéticos dispostos em uma estrutura estática, pelos quais circula a corrente I_E , produz tensões alternadas em seus enrolamentos girantes. Essas tensões, são retificadas por uma ponte trifásica de diodos também girante, promove a circulação da corrente I_G , conforme mostrado na figura a seguir.

Cabe salientar que o desenvolvimento da excitação *brushless* trouxe consigo um progresso significativo, haja vista que deixaram de existir os costumeiros problemas relacionados ao contato anel-escova e, também, permitiu uma redução significativa na potência do circuito de alimentação do campo quando comparada à excitação estática (contato anel-escova).



- L_E – campo da excitatriz (parte estática);
- I_E – corrente no campo da excitatriz;
- B_{3F} – conjunto trifásico de bobinas (parte rotativa);
- P_{RD} – ponte trifásica rotativa a diodos;
- L_G – campo do gerador principal.

FIGURA 2 – Excitatriz brushless

2.2 – Grandezas que serão monitoradas

As grandezas elétricas que estão sendo monitoradas para atender ao propósito do projeto são:

- Tensão no rotor do gerador
- Corrente no rotor do gerador
- Temperatura no campo da excitatriz
- Temperatura no rotor do gerador
- Resistência do campo da excitatriz
- Resistência do rotor

3.0 - MODELAGEM

A seguir estão apresentados os primeiros resultados da modelagem matemática realizada a partir dos ensaios/levantamento de campo.

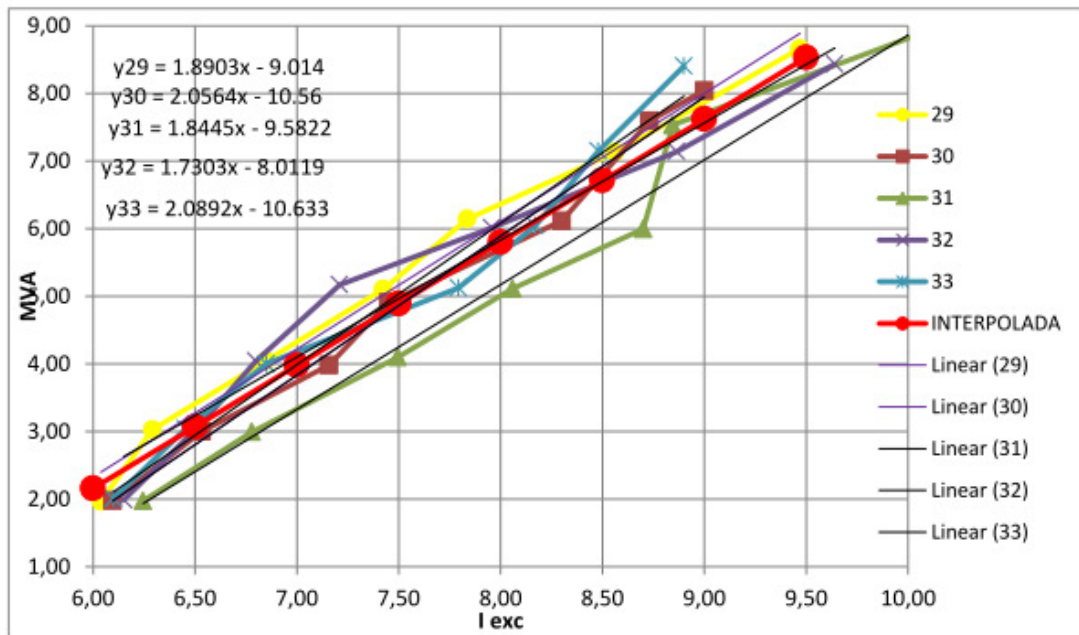


FIGURA 3 – Curvas características dos geradores operando em carga

As grandezas registradas no levantamento das curvas características reais de operação de cinco unidades geradoras foram analisadas e comparadas com a curva de operação teórica esperada. As análises realizadas fornecerão subsídios técnicos para a modelagem matemática do comportamento operacional do gerador

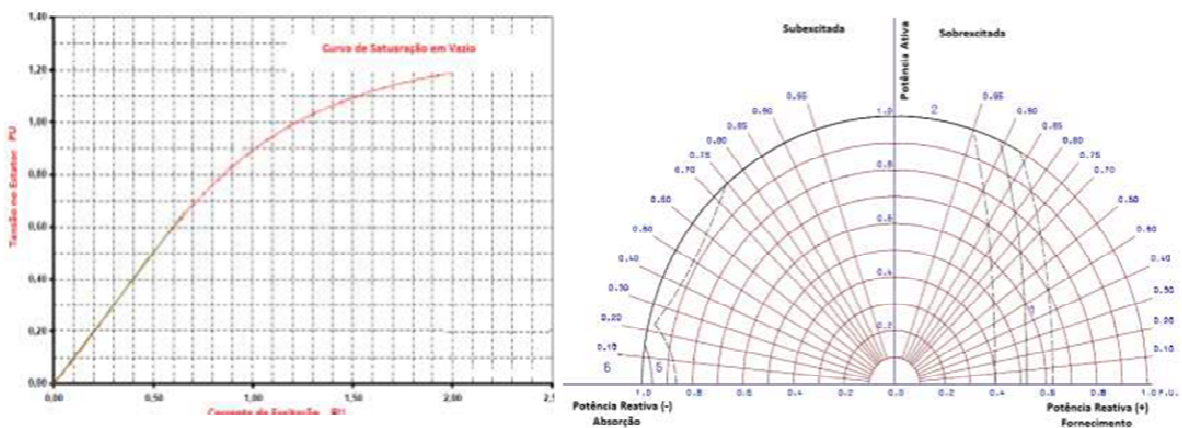


FIGURA 4 – Curvas de saturação em vazio e de capacidade dos geradores

4.0 - MAPEAMENTO DE FALHAS NA EXCITAÇÃO E NO GERADOR

Conforme já mencionado neste trabalho, paralelamente aos estudos de modelagem foram realizados os estudos de mapeamento de falhas dos geradores, os quais serão fundamentados nas curvas características obtidas em campo associadas às curvas reais esperadas para os mesmos. Dentro deste contexto, a seguir serão apresentadas as tabelas contendo as variáveis utilizadas nas equações e lógicas desenvolvidas para o algoritmo implementado no software embarcado no PLC de monitoramento e controle do sistema.

Tabela 1 – Cálculos iniciais

Cálculos Iniciais	
Variável	Descrição
Vr	Tensão no rotor do gerador
Ir	Corrente no rotor do gerador
Trexc	Temperatura no campo da excitatriz
Trg	Temperatura no rotor do gerador
Rexc	Resistência do campo da excitatriz
Rr	Resistência do rotor

Tabela 2 – Variáveis versus falhas

Variáveis de Entrada	Modelagem	Falha/Defeito
Vexc	Conjunto de Equações	Falha no campo da Excitatriz
Iexc		
Vexc	Conjunto de Equações	Falha na ponte rotativa ou falha no estator da excitatriz
Iexc		
Q		
Iexc	Conjunto de Equações	Falha no rotor do gerador
P		
Q		
Vt		
Is		

Tabela 3 – Regras versus falhas

Falha/Defeito	Regras	Mapeamentos
Falha no Campo da Excitatriz	Regras FCEXC	Curto entre espiras
		Curto entre pólos
		Falhas na conexão
		Sobret temperatura
Falha na ponte rotativa ou no estator da excitatriz	Regras FEEXC	Rompimento de diodos
		Curto nos diodos
		Fuga a terra
Falha no Rotor do Gerador	FRGER	Falhas na conexão
		Curto entre espiras
		Curto entre pólos
		Fuga a terra
		Sobret temperatura
		Impregnação de sujeira

Tabela 4 – Análise pré-operacional

Análise Pré-Operacional		
Variáveis	Regras	Equipamento
Vexc	Regras APEXC	Excitatriz
Iexc		
Vt		
Vexc	Regras APRGE	Rotor do Gerador
Iexc		
I _r		
Vt		
I _{rotor}	Regras APEGE	Estator do Gerador
Vt		

5.0 - DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO

Basicamente, as variáveis de interesse foram obtidas através da rede ethernet, existente na sala de controle, que transmite as informações obtidas em campo para os CLP's do sistema de supervisão e controle da Usina, conforme o diagrama ilustrativo apresentado a seguir, a comunicação entre o Switch e o sistema de monitoramento será através de protocolo aberto.

Com a utilização da rede de comunicação existente para obtenção dos dados, não houve a necessidade de inserção de outros meios físicos (fibra-óptica, cabo de rede, etc.) para trafegar as informações do campo para o sistema de monitoramento, tornando o sistema mais simples e confiável.

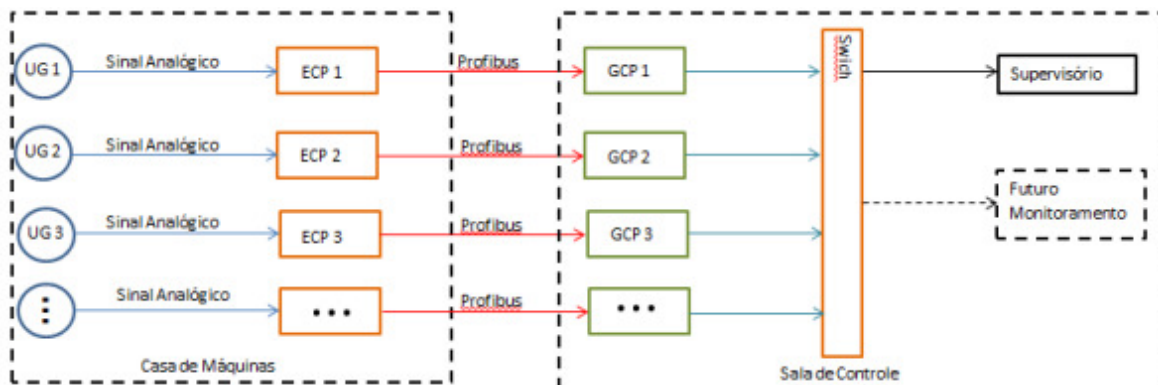


FIGURA 5 – Arquitetura de comunicação do projeto na usina

6.0 - CONCLUSÃO

Frequentemente a equipe de manutenção tem uma percepção de que o equipamento, seja uma unidade geradora, ou seus agregados, não estão operando como se esperava, mas mesmo assim tomam a decisão de aguardar até que o equipamento saia de operação para desmontá-lo, a fim de descobrir e reparar seus defeitos, partindo para uma exploração “cirúrgica” antes de ter qualquer compreensão sobre qual é realmente o problema com o equipamento. Embora uma inspeção visual e a execução de uma bateria de testes *off-line* possam ser bastante úteis na detecção da extensão de alguns problemas, eles demandam muito tempo e dinheiro na sua condução. Sem mencionar o fato de que frequentemente o processo de desmontagem e remontagem do equipamento provoca mais defeitos do que simplesmente deixá-lo em funcionamento. Uma forma mais econômica de abordar a manutenção do equipamento envolve o seu monitoramento contínuo (ou por um certo período), na sua condição normal de operação, e, na detecção de qualquer problema, efetivar uma parada com um programa de testes que capture o(s) motivo(s) do(s) problema(s) apontado(s) durante o período de monitoramento. Em outras palavras, o planejamento de manutenções baseados na condição do equipamento e não nas suas horas em operação é o que visamos com este projeto. Consideramos este trabalho relevante do ponto de vista técnico porque contribuirá para o efetivo monitoramento de geradores de energia que utilizam sistemas de excitação *brushless*, que são

largamente utilizados tanto em pequenas centrais hidrelétricas quanto em usinas de grande porte. Do ponto de vista econômico, o projeto contribuirá para a diminuição dos custos da manutenção devido ao monitoramento contínuo dos geradores brushless, capacitando aos planejadores da manutenção intervir preventivamente.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DÉLVIO FRANCO BERNARDES. Sistema de Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Geradores com Sistema de Excitação Brushless na EPASA. 02-RM-PD Brushless. Itajubá-MG: SD Soluções Ltda., 2014. . Acesso em: 04 mar. 2015.
- (2) DÉLVIO FRANCO BERNARDES. Sistema de Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Geradores com Sistema de Excitação Brushless na EPASA. 03-RM-PD Brushless. Itajubá-MG: SD Soluções Ltda., 2014. . Acesso em: 07 mar. 2015.
- (3) GREG STONE. Short Seminar on Condition Monitoring for Rotating Machines. São Paulo-SP: Iris Power–A Qualitrol Company, 24 fev. 2015.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



- Nome; Mario Marcio Torres

- Local e ano de nascimento; São Paulo – 26/07/1966

- Local e ano graduação/pós-graduação; Possui especialização em Sistemas Elétricos de Potência pela UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá-MG (2008) e Especialização em Gestão de Ativos do Setor Elétrico com MBA pela UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas (2007). Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Faculdade Politécnica de Jundiaí (2004) e graduação em Biblioteconomia pela Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo (1995).

- Experiência profissional:

Trabalhou em empresas como ELETROPAULO, CESP, CTEEP. Atualmente é Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento Sênior na área de Tecnologia e Inovação da Geração na CPFL GERAÇÃO em Campinas-SP.

ANEXO B – Lógica implementada no desenvolvimento experimental

FC1109 - <offline>

"FC_PeD_Main" FC Principal do PeD

Name: Family:**Author:** Version: 0.1**Block version:** 2**Time stamp Code:** 08/11/2017 04:00:07 PM**Interface:** 07/27/2017 02:21:00 PM**Lengths (block/logic/data):** 03248 02946 00154

Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
P	Real	0.0	
Q	Real	4.0	
Vta	Real	8.0	
Vtb	Real	12.0	
Vtc	Real	16.0	
Isa	Real	20.0	
Vexc	Real	24.0	
Iexc	Real	28.0	
Coef_a_SP	Real	32.0	
BM_CM_SP	Real	36.0	
Texc_crit_SP	Real	40.0	
Texc_alta_SP	Real	44.0	
Temp_exc_SP	Real	48.0	
Res_exc_SP	Real	52.0	
desv_1_diod_SP	Real	56.0	
desv_2_diod_SP	Real	60.0	
Desv_VA_VB_SP	Real	64.0	
Desv_VA_VC_SP	Real	68.0	
Desv_VB_VC_SP	Real	72.0	
Resperada	Real	76.0	
OUT		0.0	
Vta_DB	Real	80.0	
Vtb_DB	Real	84.0	
Vtc_DB	Real	88.0	

FC1110 - <offline>

"FC_PeD_Call" Chamada da lógica do projeto P&D

Name: **Family:**

Author: **Version:** 0.1

Block version: 2

Time stamp Code: 07/28/2017 08:44:55 AM

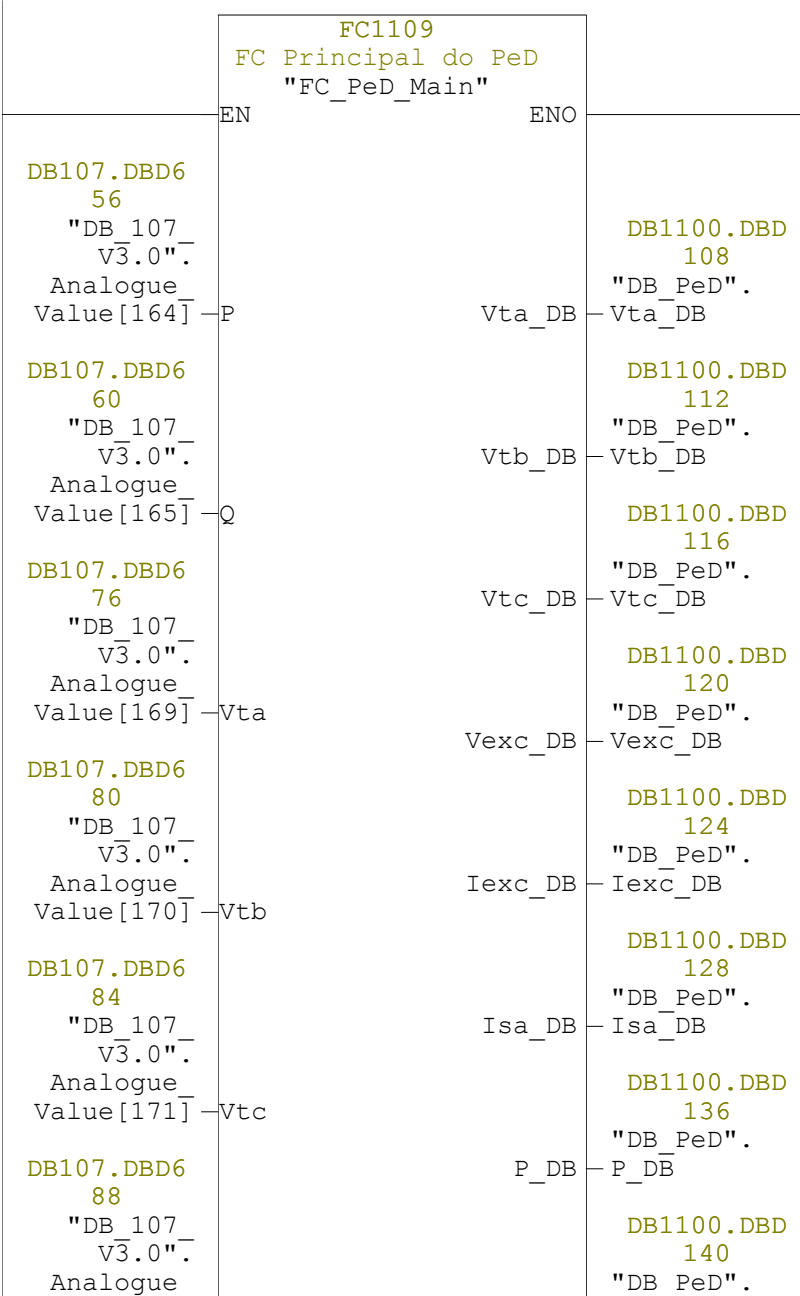
Interface: 07/10/2017 05:27:09 PM

Lengths (block/logic/data): 01864 01748 00198

Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
OUT		0.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
Ativa_Outras	Bool	0.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Block: FC1110

Network: 1 Lógica P&D aplicada

DB1100.DBD
108
"DB_PeD".
Vta_DBDB1100.DBD
112
"DB_PeD".
Vtb_DBDB1100.DBD
116
"DB_PeD".
Vtc_DBDB1100.DBD
120
"DB_PeD".
Vexc_DBDB1100.DBD
124
"DB_PeD".
Iexc_DBDB1100.DBD
128
"DB_PeD".
Isa_DBDB1100.DBD
136
"DB_PeD".
P_DBDB1100.DBD
140
"DB_PeD".

Value[172]	Isa	Q_DB	Q_D \bar{B}
MD200 Excitation Voltage	"V_		
Excitation	"_Vexc		
MD204 Excitation Current	"I_		
Excitation	"_Iexc		
DB1100.DBD 0	"DB_PeD".		
Coef_a_SP	Coef_a_SP		
DB1100.DBD 4	"DB_PeD".		
BM_CM_SP	BM_CM_SP		
DB1100.DBD 8	"DB_PeD".		
Texc_crit_	Texc_crit_		
SP	crit_SP		
DB1100.DBD 12	"DB_PeD".		
Texc_alta_	Texc_alta_		
SP	alta_SP		
DB1100.DBD 16	"DB_PeD".		
Temp_exc_	Temp_exc_		
SP	SP		
DB1100.DBD 20	"DB_PeD".		
Res_exc_	Res_exc_		
SP	SP		
DB1100.DBD 24			

"DB_PeD".	
desv_1	desv_1
diod_SP	diod_SP
DB1100.DBD	
28	
"DB_PeD".	
desv_2	desv_2
diod_SP	diod_SP
DB1100.DBD	
32	
"DB_PeD".	
Desv_VA	Desv_VA
VB_SP	VB_SP
DB1100.DBD	
36	
"DB_PeD".	
Desv_VA	Desv_VA
VC_SP	VC_SP
DB1100.DBD	
40	
"DB_PeD".	
Desv_VB	Desv_VB
VC_SP	VC_SP
DB1100.DBD	
144	
"DB_PeD".	
Resperada	Resperada
DB1100.DBD	
44	
"DB_PeD".	
Coef_a	Coef_a
DB1100.DBD	
48	
"DB_PeD".	
BM_CM	BM_CM
DB1100.DBD	
52	
"DB_PeD".	
Texc_crit	Texc_crit
DB1100.DBD	
56	
"DB_PeD".	

Texc_alta	Texc_alta
DB1100.DBD	
60	
"DB_PeD".	
Temp_exc	Temp_exc
DB1100.DBD	
64	
"DB_PeD".	
Res_exc	Res_exc
DB1100.DBD	
68	
"DB_PeD".	
desv_1_	desv_1_
diod	diod
DB1100.DBD	
72	
"DB_PeD".	
desv_2_	desv_2_
diod	diod
DB1100.DBD	
76	
"DB_PeD".	Desv_VA_
Desv_VA_VB	VB
DB1100.DBD	
80	
"DB_PeD".	Desv_VA_
Desv_VA_VC	VC
DB1100.DBD	
84	
"DB_PeD".	Desv_VB_
Desv_VB_VC	VC
DB1100.DBD	
88	
"DB_PeD".	
Vt_esp	Vt_esp
DB1100.DBD	
92	
"DB_PeD".	
Rexc	Rexc
DB1100.DBD	
96	

"DB_PeD". S_MVA	S_MVA
DB1100.DBD 100	
"DB_PeD". Temp_calc	Temp_calc
DB1100.DBD 148	
Coefficient e "a" Eq1	
"DB_PeD". coef_a_eq1	coef_a_ eq1
DB1100.DBD 156	
Coefficient e "a" Eq2	
"DB_PeD". coef_a_eq2	coef_a_ eq2
DB1100.DBD 164	
Coefficient e "a" Eq3	
"DB_PeD". coef_a_eq3	coef_a_ eq3
DB1100.DBD 152	
Coefficient e "b" Eq1	
"DB_PeD". coef_b_eq1	coef_b_ eq1
DB1100.DBD 160	
Coefficient e "b" Eq2	
"DB_PeD". coef_b_eq2	coef_b_ eq2
DB1100.DBD 168	
Coefficient e "b" Eq3	
"DB_PeD". coef_b_eq3	coef_b_ eq3
DB1100.DBD	

172

Divergenci
a entre
Iexc
Esperado
e Iexc
Real
"DB_PeD".
D_Ie_IeR-D_Ie_IeR

DB1100.DBX
104.4
"DB_PeD".
Fal_mag-Fal_mag

DB1100.DBX
104.5
"DB_PeD". Fal_cpEx_
Fal_cpEx_T-T

DB1100.DBX
104.6
"DB_PeD". Fal_cpEx_
Fal_cpEx_C-C

DB1100.DBX
104.7
"DB_PeD".
Fal_esGer-Fal_esGer

DB1100.DBX
105.0
"DB_PeD". Fal_1_
Fal_1_diod-diod

DB1100.DBX
105.1
"DB_PeD". Fal_2_
Fal_2_diod-diod

DB1100.DBX
105.2
"DB_PeD".
Fal_Desv_ Fal_Desv_
Vab-Vab

DB1100.DBX
105.3
"DB_PeD".
Fal_Desv_ Fal_Desv_
Vac-Vac

DB1100.DBX
105.4
"DB_PeD".
Fal_Desv_ Fal_Desv_
Vbc Vbc

DB1100.DBX
105.5
"DB_PeD".
Fal_mag_ Fal_mag_
Vta Vta

DB1100.DBX
105.6
"DB_PeD".
Fal_mag_ Fal_mag_
Vtb Vtb

DB1100.DBX
105.7
"DB_PeD".
Fal_mag_ Fal_mag_
Vtc Vtc

DB1100.DBX
106.0
"DB_PeD".
Fal_Ger_ Fal_Ger_
Sinc_Vta Sinc_Vta

DB1100.DBX
106.1
"DB_PeD".
Fal_Ger_ Fal_Ger_
Sinc_Vtb Sinc_Vtb

DB1100.DBX
106.2
"DB_PeD".
Fal_Ger_ Fal_Ger_
Sinc_Vtc Sinc_Vtc

DB1100.DBX
106.3
"DB_PeD".
Fal_1 Fal_1
diod_Vta diod_Vta

DB1100.DBX
106.4

"DB_PeD". Fal_2 diod_Vtā	Fal_2 diod_Vtā
DB1100.DBX 106.5	
"DB_PeD". Fal_1 diod_Vtb	Fal_1 diod_Vtb
DB1100.DBX 106.6	
"DB_PeD". Fal_2 diod_Vtb	Fal_2 diod_Vtb
DB1100.DBX 106.7	
"DB_PeD". Fal_1 diod_Vtc	Fal_1 diod_Vtc
DB1100.DBX 107.0	
"DB_PeD". Fal_2 diod_Vtc	Fal_2 diod_Vtc
DB1100.DBX 104.0	
"DB_PeD". Rec_Test_ Mag	Rec_Test_ Mag
DB1100.DBX 104.1	
"DB_PeD". Fal_Ger_ Sinc	Fal_Ger_ Sinc
DB1100.DBX 104.2	
"DB_PeD". Alm_Texc_ elev	Alm_Texc_ elev
DB1100.DBX 104.3	
"DB_PeD". Fal_rotGer	Fal_rotGer

FC1101 - <offline>

"FC_Move_SP_var_Ped"

Name:
Author:
Time stamp Code:
Interface:
Lengths (block/logic/data):

Family:
Version: 0.1
Block version: 2
 07/27/2017 02:19:54 PM
 07/27/2017 02:19:54 PM
 00402 00192 00000

Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
Coef_a2	Real	0.0	
BM_CM2	Real	4.0	
Texc_crit2	Real	8.0	
Texc_alta2	Real	12.0	
Temp_exc2	Real	16.0	
Res_exc2	Real	20.0	
desv_1_diod2	Real	24.0	
desv_2_diod2	Real	28.0	
Desv_VA_VB2	Real	32.0	
Desv_VA_VC2	Real	36.0	
Desv_VB_VC2	Real	40.0	
P	Real	44.0	
Q	Real	48.0	
Vta	Real	52.0	
Vtb	Real	56.0	
Vtc	Real	60.0	
Isa	Real	64.0	
Vexc	Real	68.0	
Iexc	Real	72.0	
OUT		0.0	
Coef_a	Real	76.0	
BM_CM	Real	80.0	
Texc_crit	Real	84.0	
Texc_alta	Real	88.0	

FC1102 - <offline>

"FC_PeD_Calc" Cálculos preliminares do Ped

Name: **Family:****Author:** **Version:** 0.1**Block version:** 2**Time stamp Code:** 05/26/2017 11:37:45 AM**Interface:** 05/26/2017 11:37:45 AM**Lengths (block/logic/data):** 00238 00116 00014

Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
Vexc	Real	0.0	
Iexc	Real	4.0	
P	Real	8.0	
Q	Real	12.0	
OUT		0.0	
Rexc	Real	16.0	
S_MVA	Real	20.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
P_quad	Real	0.0	
Q_quad	Real	4.0	
calc_MVA_1	Bool	8.0	
som_P_Q	Real	10.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Block: FC1102 Cálculos

FC1100 - <offline>

"FC_Falha_cmp_Exc" Falha no campo da Excitatriz
Name:
Author: **Family:**
Version: 0.1
Block version: 2
Time stamp Code: 07/27/2018 01:30:55 PM
Interface: 07/26/2017 03:11:47 PM
Lengths (block/logic/data): 00562 00408 00036

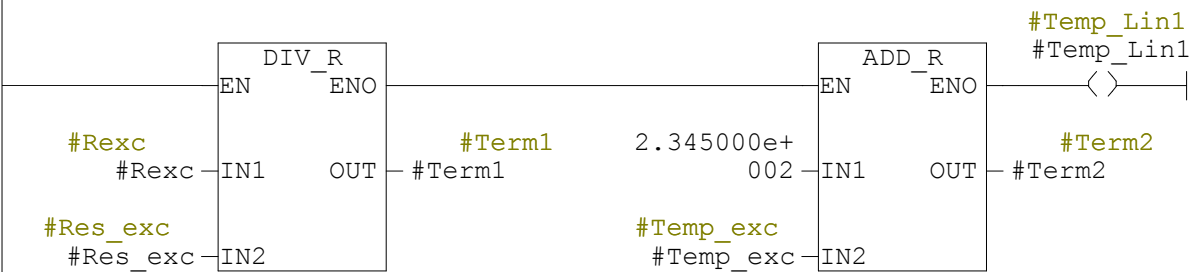
Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
Rexc	Real	0.0	
Res_exc	Real	4.0	
Temp_exc	Real	8.0	
Resperada	Real	12.0	
Texc_alta	Real	16.0	
Texc_crit	Real	20.0	
OUT		0.0	
Fal_cpEx_T	Bool	24.0	
Alm_Texc_elev	Bool	24.1	
Fal_cpEx_C	Bool	24.2	
IN_OUT		0.0	
Temp_calc	Real	26.0	
TEMP		0.0	
Term1	Real	0.0	
Term2	Real	4.0	
Temp_Lin1	Bool	8.0	
Term3	Real	10.0	
temp_calc_r	Bool	14.0	
R_rel	Real	16.0	
R_rel_men1	Real	20.0	
L1_cmp_R	Bool	24.0	
R_rel_men1_abs	Real	26.0	
Temp_DesvR	Real	30.0	
RETURN		0.0	

Name	Data Type	Address	Comment
RET_VAL		34.0	

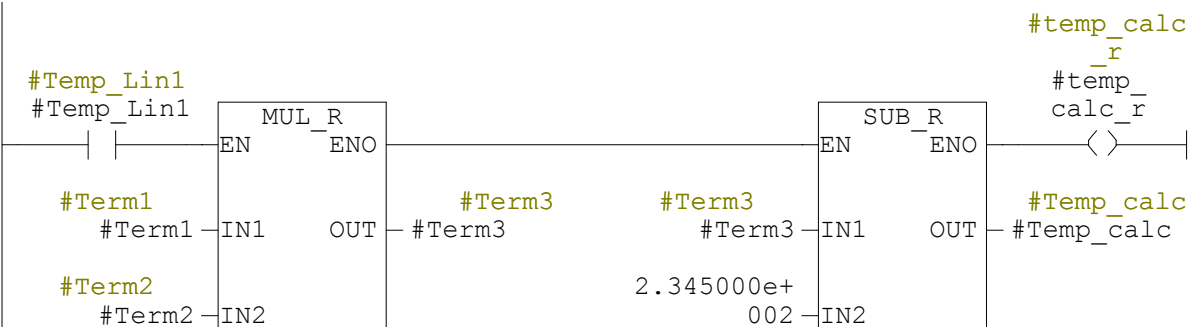
Block: FC1100 Diagnóstico - Falha no campo da Excitatriz

Lógica para investigar diagnóstico da Falha da magnetização relacionada a Falha no campo da Excitatriz

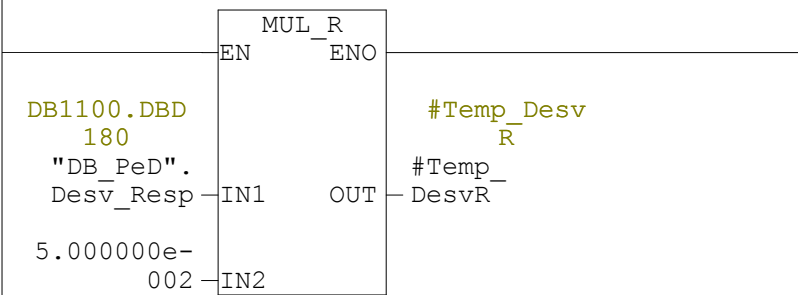
Network: 1 Cálculos



Network: 2 Temp. Ensaio Excit.

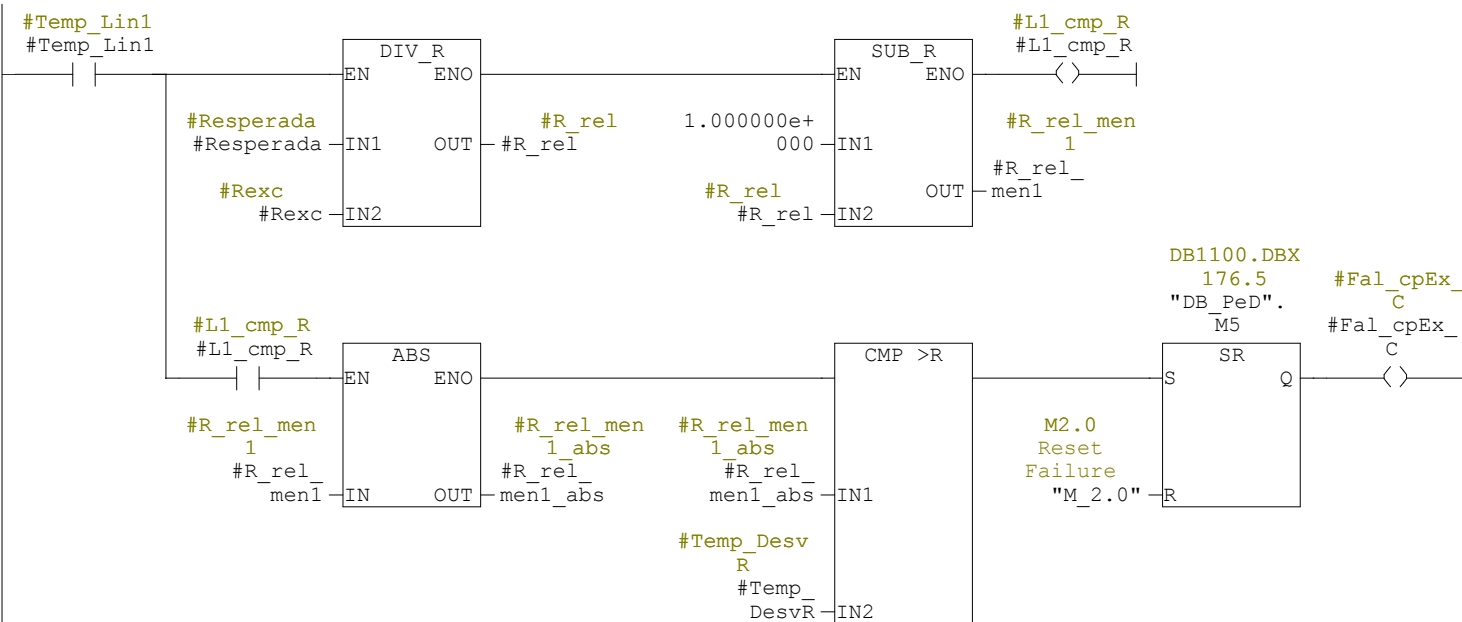


Network: 4



Network: 5 Falha no campo da Excitatriz - Conexão

Diagnóstico pela difereça das Resistências - Falha de conexão
 - Quando a diferença entre Rcalc e Resperada for maior que 5% a falha será diagnosticada



FC1103 - <offline>

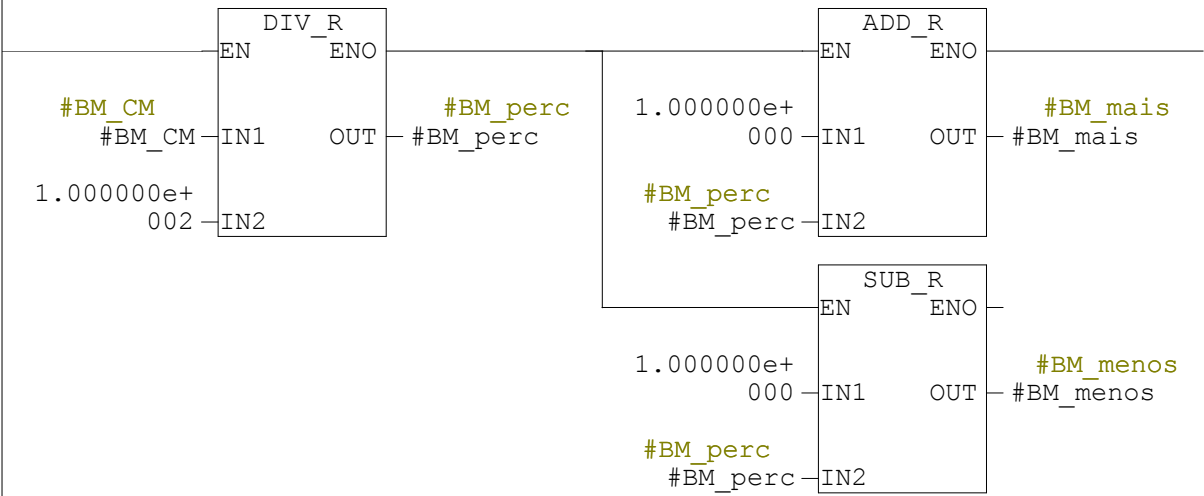
"FC_Fal_Mag_vaz" FC Falha Mag. vazio

Name: **Family:****Author:** **Version:** 0.1**Block version:** 2**Time stamp Code:** 08/01/2017 04:54:06 PM**Interface:** 05/26/2017 02:21:12 PM**Lengths (block/logic/data):** 00358 00226 00028

Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
P	Real	0.0	
BM_CM	Real	4.0	
Coef_a	Real	8.0	
Iexc	Real	12.0	
Vt_real	Real	16.0	
OUT		0.0	
Fal_mag	Bool	20.0	
IN_OUT		0.0	
Vt_esp	Real	22.0	
TEMP		0.0	
BM_mais	Real	0.0	
BM_menos	Real	4.0	
Max_vt_real	Real	8.0	
Min_vt_real	Real	12.0	
comp_max	Bool	16.0	
comp_min	Bool	16.1	
BM_perc	Real	18.0	
TEMP0	Real	22.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

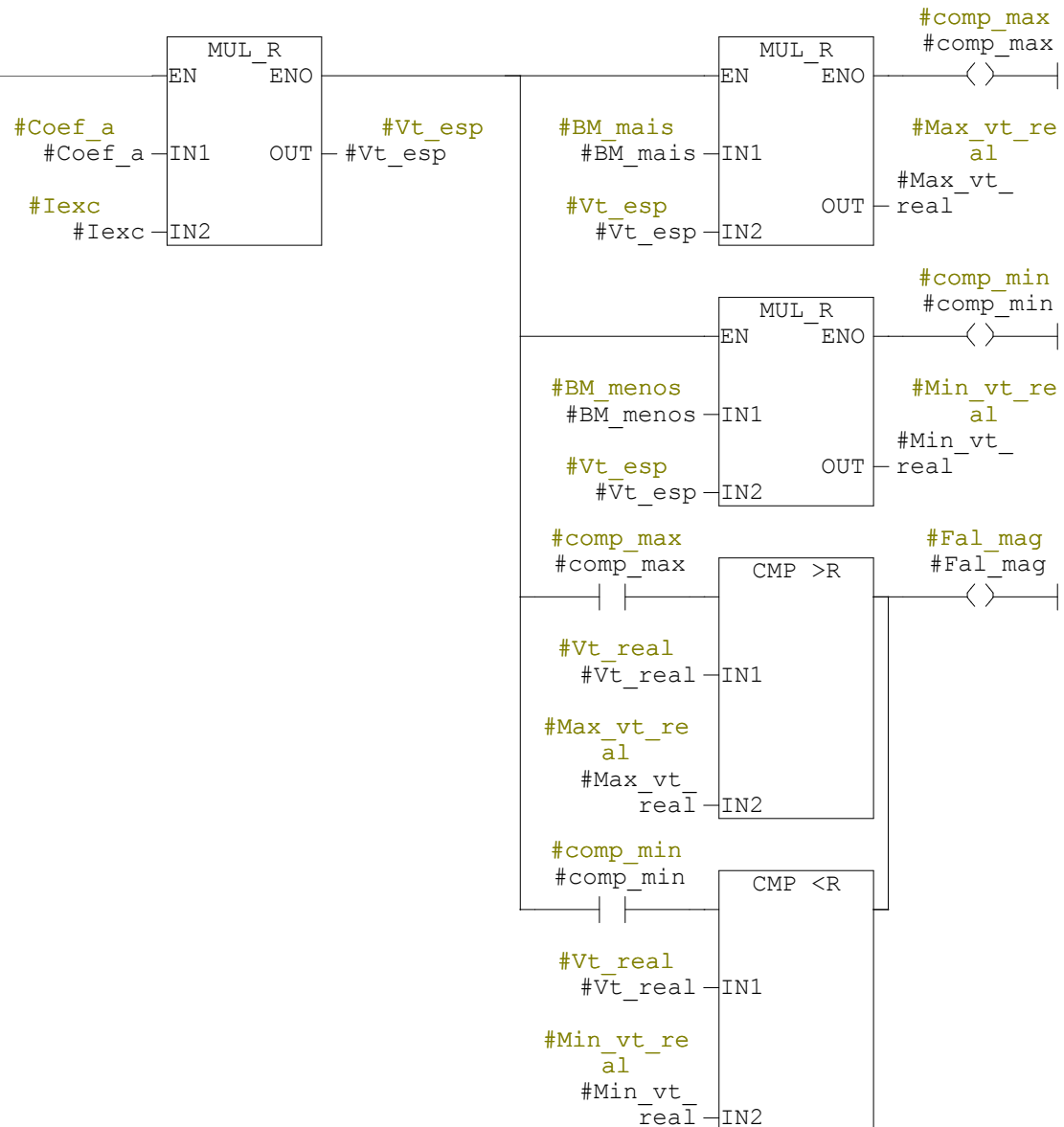
Block: FC1103

Network: 1 Gerador em vazio - Cálculos preliminares



Network: 2 Gerador em vazio - Lógica Falha da magnetização

Lógica Falha da magnetização em vazio



FC1104 - <offline>

"FC_Falha_est_ger" Lógica para Diagnostico de Falha Estator

Name: Family:**Author:** Version: 0.1**Block version:** 2**Time stamp Code:** 08/01/2017 03:46:00 PM**Interface:** 06/02/2017 11:45:20 AM**Lengths (block/logic/data):** 00712 00540 00054

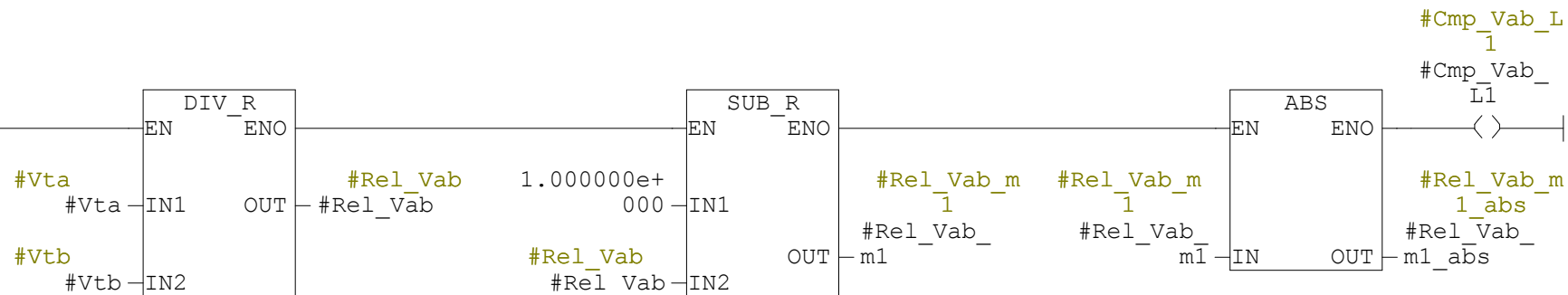
Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
Vta	Real	0.0	
Vtb	Real	4.0	
Vtc	Real	8.0	
Desv_VA_VB	Real	12.0	
Desv_VA_VC	Real	16.0	
Desv_VB_VC	Real	20.0	
OUT		0.0	
Fal_esGer	Bool	24.0	
IN_OUT		0.0	
Fal_Desv_Vab	Bool	26.0	
Fal_Desv_Vac	Bool	26.1	
Fal_Desv_Vbc	Bool	26.2	
TEMP		0.0	
Rel_Vab	Real	0.0	
Rel_Vab_m1	Real	4.0	
Rel_Vab_m1_abs	Real	8.0	
Cmp_Vab_L1	Bool	12.0	
Rel_Vab_100	Real	14.0	
Rel_Vac	Real	18.0	
Rel_Vac_m1	Real	22.0	
Rel_Vac_m1_abs	Real	26.0	
Cmp_Vac_L1	Bool	30.0	
Rel_Vac_100	Real	32.0	
Rel_Vbc	Real	36.0	

Name	Data Type	Address	Comment
Rel_Vbc_m1	Real	40.0	
Rel_Vbc_m1_abs	Real	44.0	
Cmp_Vbc_L1	Bool	48.0	
Rel_Vbc_100	Real	50.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

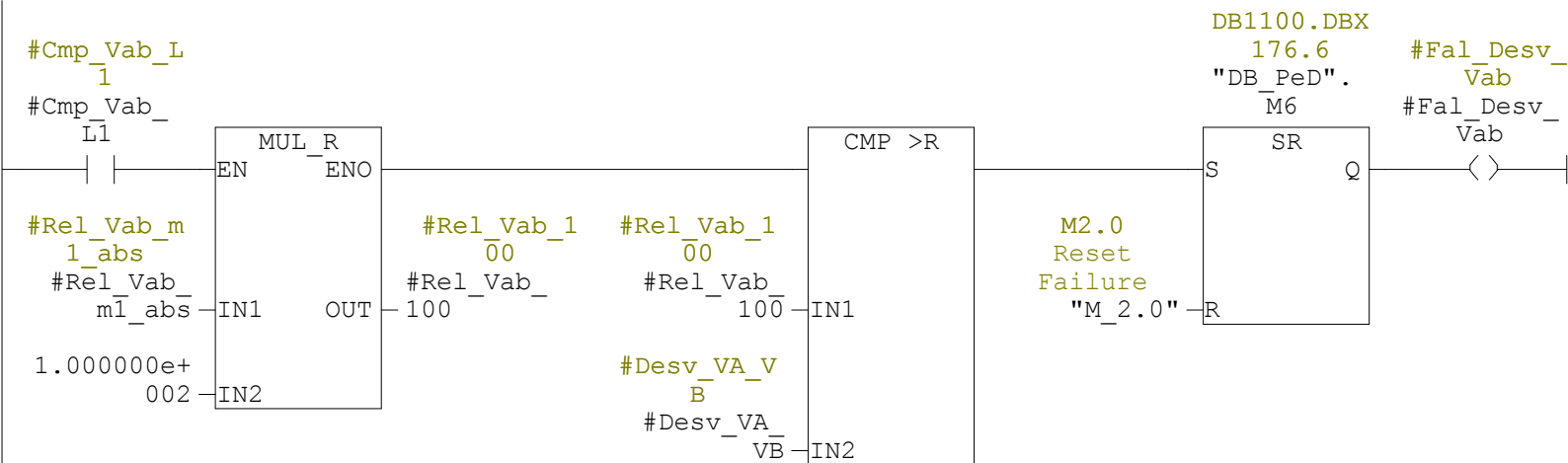
Block: FC1104 Diagnóstico - Falha no Estador do Gerador

Lógica para investigar diagnóstico da Falha da magnetização relacionada a Falha no Estador do Gerador

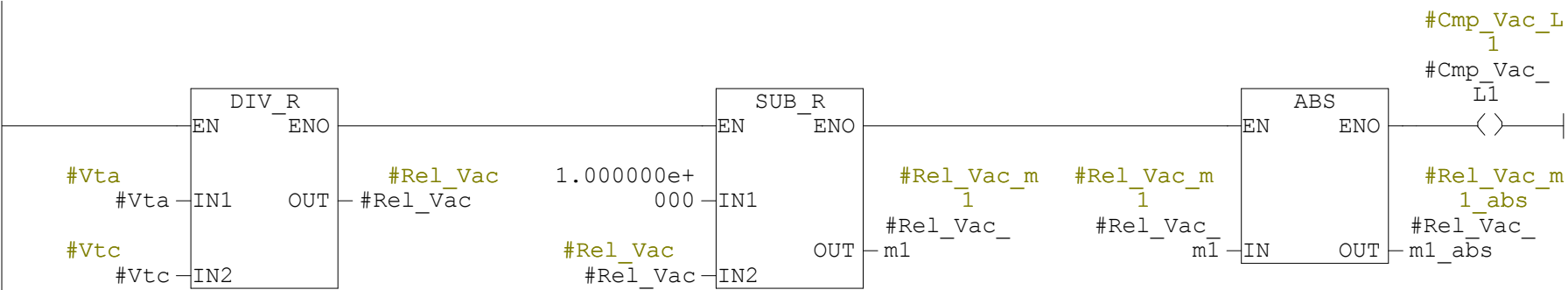
Network: 1 Lógica para Desequilíbrio Va-Vb



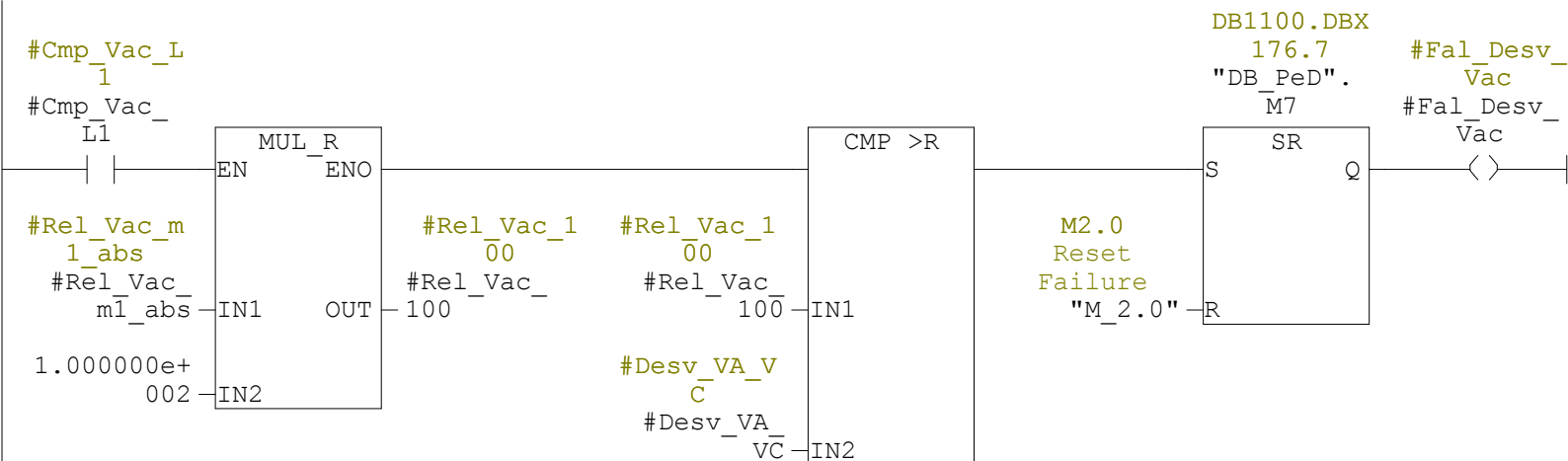
Network: 2 Falha no Estator do Gerador



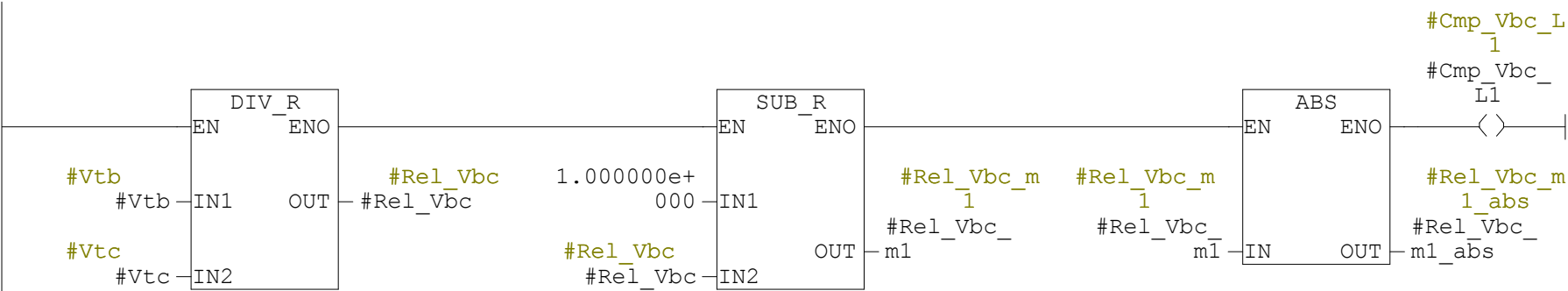
Network: 3 Lógica para Desequilíbrio Va-Vc



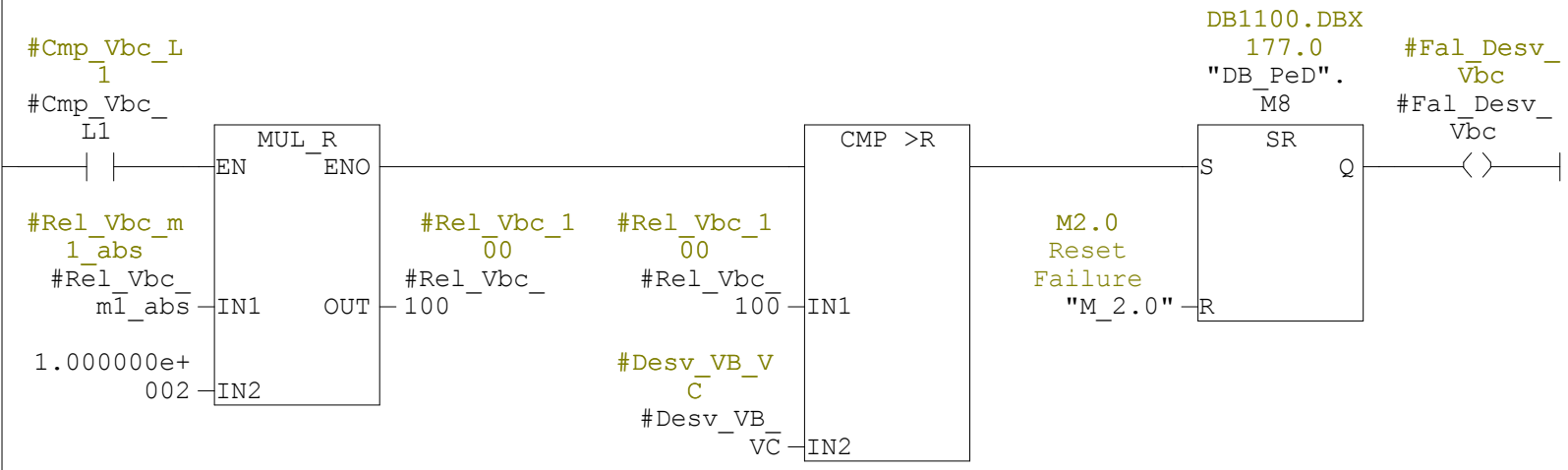
Network: 4 Falha no Estator do Gerador



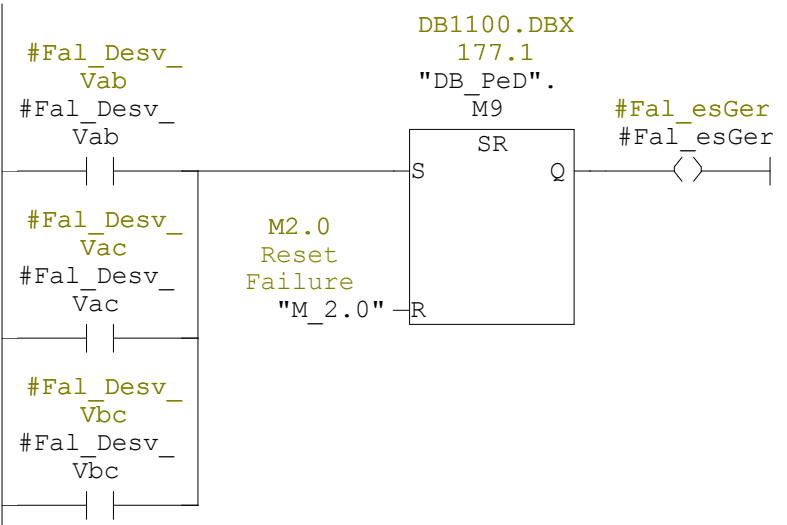
Network: 5 Lógica para Desequilíbrio Vb-Vc



Network: 6 Falha no Estator do Gerador



Network: 7 Falha no Estator do Gerador



FC1105 - <offline>

"FC_Fal_diod" FC diag. Falha Ponte de diodos

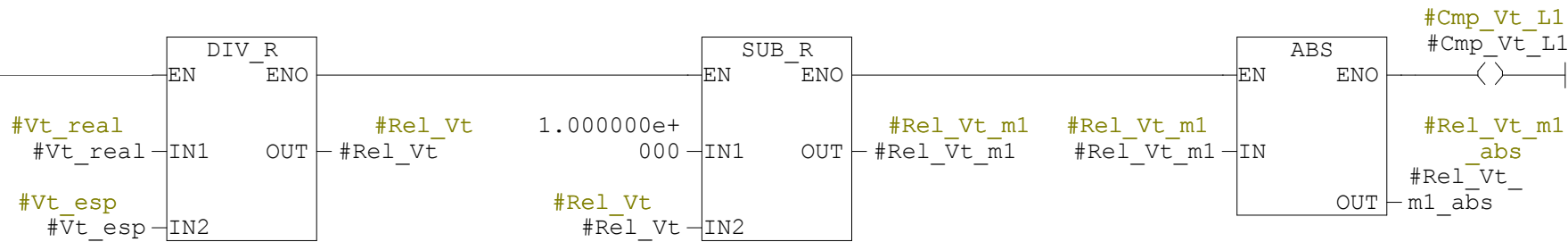
Name: **Family:****Author:** **Version:** 0.1**Block version:** 2**Time stamp Code:** 08/01/2017 05:40:27 PM**Interface:** 05/26/2017 02:19:23 PM**Lengths (block/logic/data):** 00348 00226 00020

Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
Vt_real	Real	0.0	
Vt_esp	Real	4.0	
desv_1_diod	Real	8.0	
desv_2_diod	Real	12.0	
OUT		0.0	
Fal_1_diod	Bool	16.0	
Fal_2_diod	Bool	16.1	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
Rel_Vt	Real	0.0	
Rel_Vt_m1	Real	4.0	
Rel_Vt_m1_abs	Real	8.0	
Cmp_Vt_L1	Bool	12.0	
Rel_Vt_100	Real	14.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

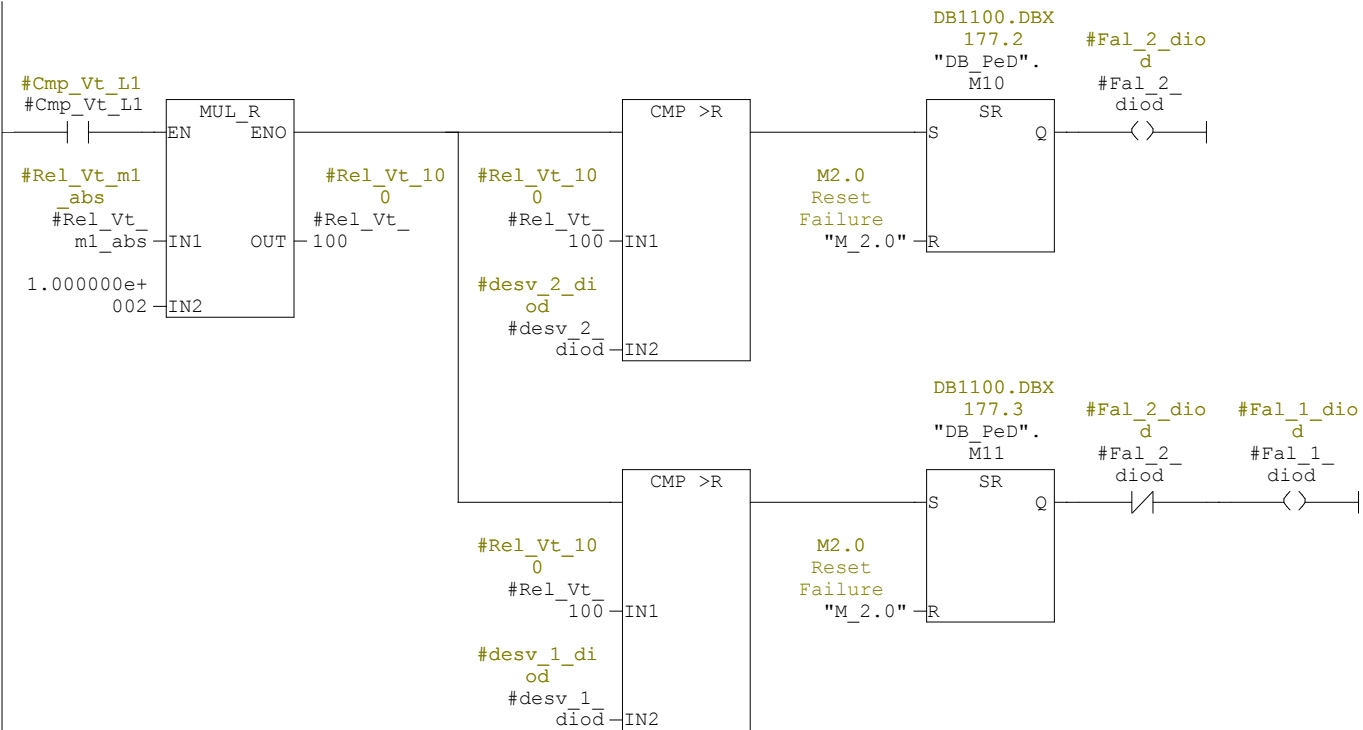
Block: FC1105 Diagnóstico - Falha na Ponte de Diodos

Lógica para investigar diagnóstico da Falha da magnetização relacionada a Falha na Ponte de Diodos

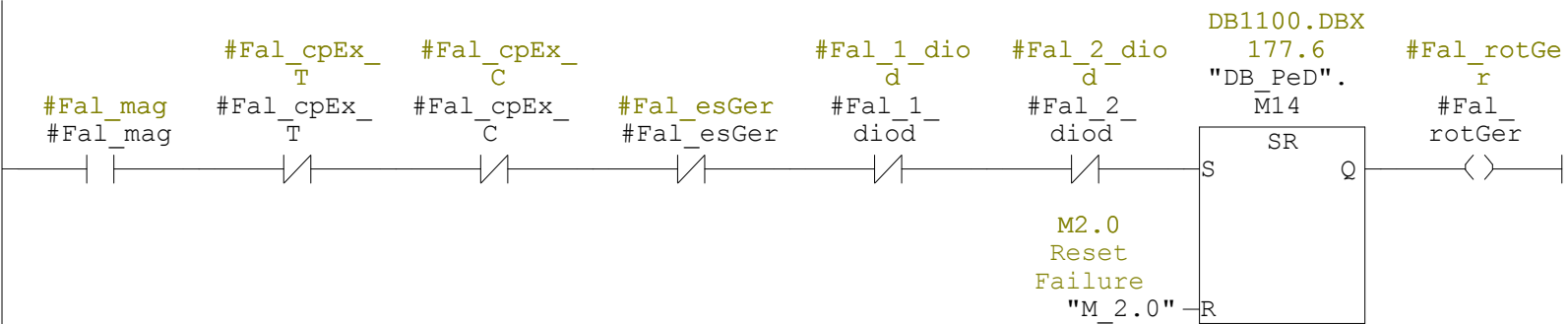
Network: 1 Falha ponte de diodos



Network: 2 Falha ponte de diodos



Network: 1 Falha no rotor do Gerador



FC1107 - <offline>

"FC_Fal_GerSin" Falha no gerador em sincronismo

Name: **Family:****Author:** **Version:** 0.1**Block version:** 2**Time stamp Code:** 08/01/2017 06:03:22 PM**Interface:** 05/26/2017 03:03:54 PM**Lengths (block/logic/data):** 00552 00380 00034

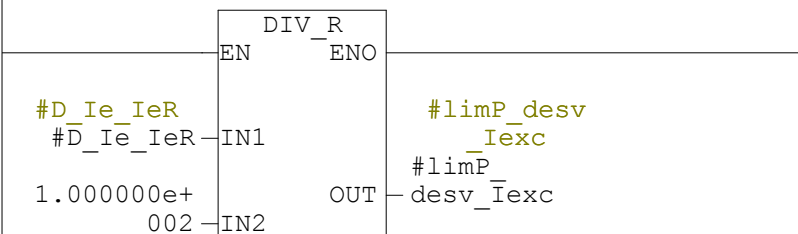
Name	Data Type	Address	Comment
IN		0.0	
D_Ie_IeR	Real	0.0	
Vt_real	Real	4.0	
S_MVA	Real	8.0	
coef_a_eq1	Real	12.0	
coef_a_eq2	Real	16.0	
coef_a_eq3	Real	20.0	
coef_b_eq1	Real	24.0	
coef_b_eq2	Real	28.0	
coef_b_eq3	Real	32.0	
Iexc	Real	36.0	
OUT		0.0	
Fal_Ger_Sinc	Bool	40.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
Eq_1	Bool	0.0	
Eq_2	Bool	0.1	
Eq_3	Bool	0.2	
BM_perc	Real	2.0	
termo1	Real	6.0	
Iexc_esp	Real	10.0	
Iexc_esp_r	Bool	14.0	
limP_desv_Iexc	Real	16.0	
Rel_Iexc	Real	20.0	
dv_Iexc	Real	24.0	

Name	Data Type	Address	Comment
Abs_dv_Iexc	Real	28.0	
dv_L1	Bool	32.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Block: FC1107 Falha no Gerador em Sincronismo

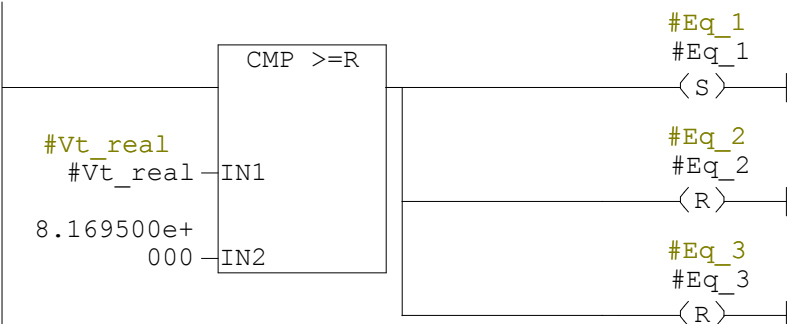
Lógica para checar Falha no Gerador em Sincronismo

Network: 1 Cálculos preliminares

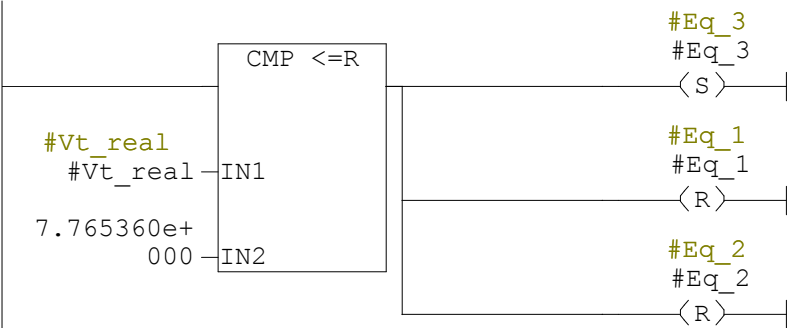


Network: 2 Gerador sincronizado - Escolha da equação

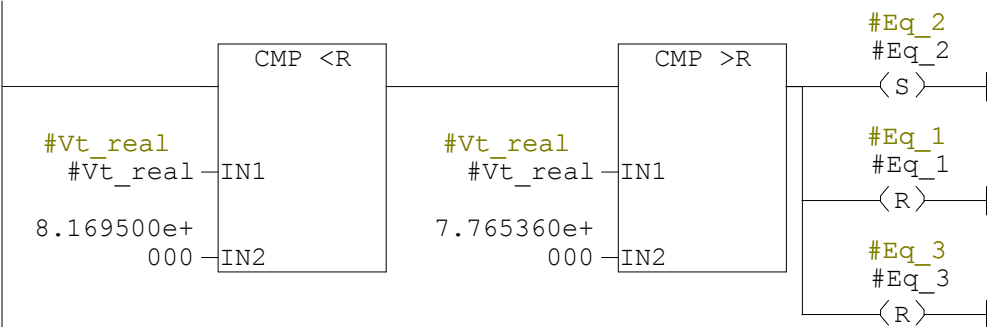
Escolha da equação de correspondência que depende de Vt



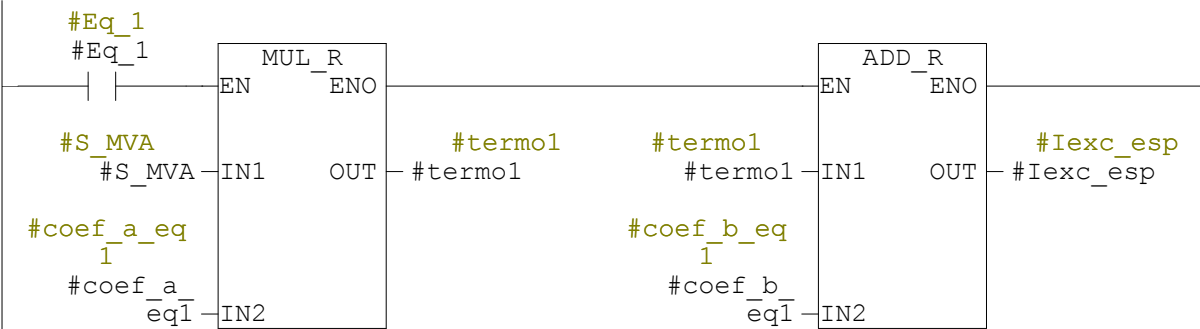
Network: 3



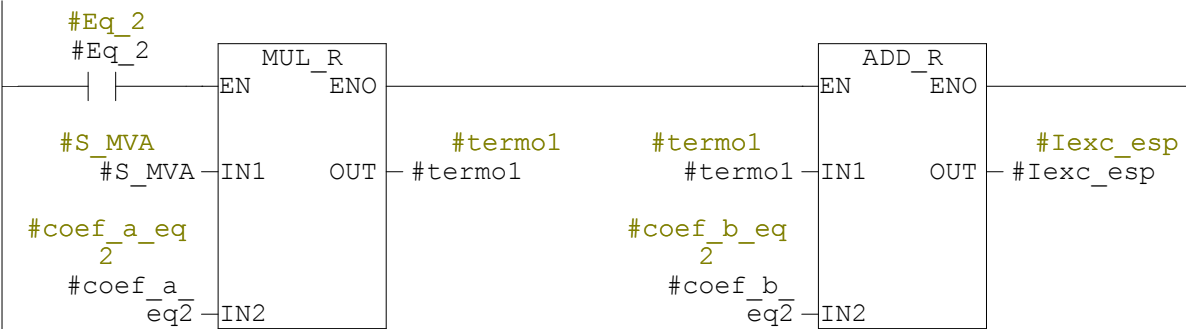
Network: 4



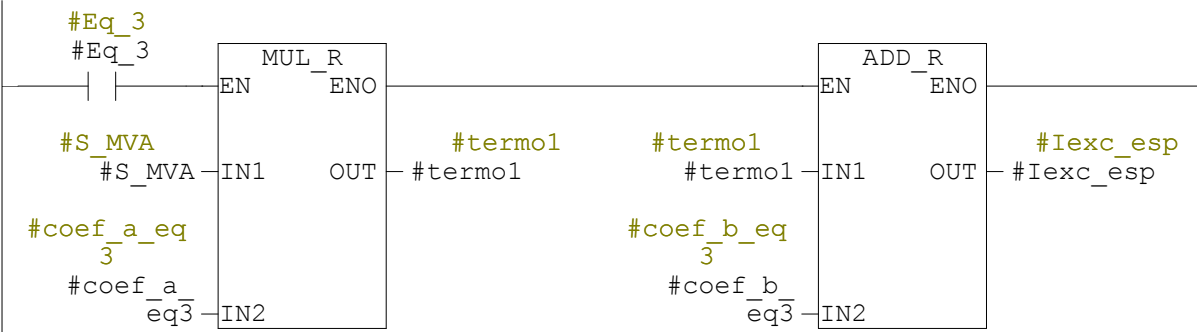
Network: 5 Gerador sincronizado - Cálculo Iexc esperado



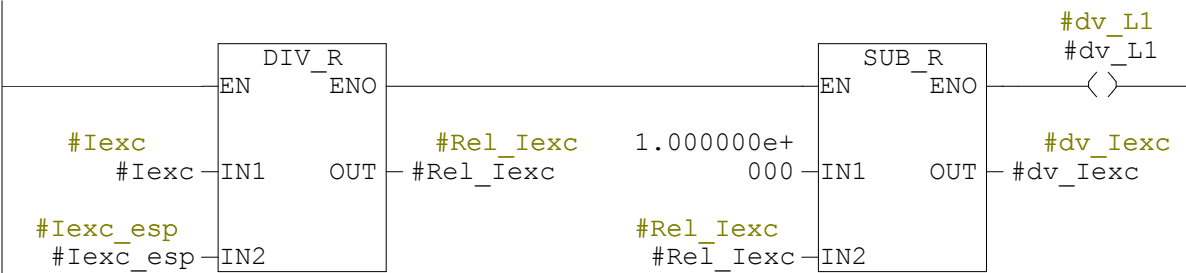
Network: 6



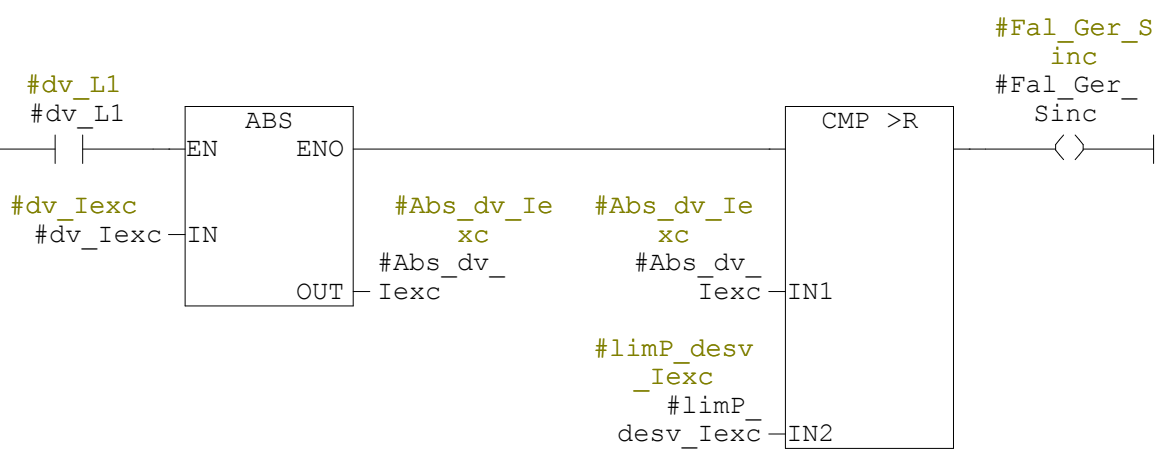
Network: 7



Network: 8 Gerador sincronizado - Lógia Falha



Network: 9 Spare



Referências

- 1 VEIGA, M. O futuro do setor elétrico, o setor elétrico do futuro. In: PSR (Ed.). [s.n.], 2015. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/arquivos/mario_veiga_fgv_seminario_sobre_matriz_e_seguranca_energetica_agosto_2015_2.pdf>. 16
- 2 MONTEIRO, J. M. *Relatório de auditoria do processo TC 003.025/2015-2*. [S.l.], 2015. 17
- 3 ALMEIDA, M. T. d. Manutenção preditiva: confiabilidade e qualidade. *Itajubá, MG*, 2000. 19
- 4 ANEEL, A. N. d. E. E. *Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica - ANEEL*. 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d?p_p_id=101_INSTANCE_ahiml6B12kVf&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=3>. 20
- 5 CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas (Portuguese Edition)*. [S.l.]: AMGH, 2013. 24, 26, 27, 42
- 6 REZEK Ângelo J. J. *Fundamentos Básicos de Máquinas Elétricas. Teorias e Ensaios (Em Portuguese do Brasil)*. [S.l.]: SYNERGIA, 2011. ISBN 8561325690. 24, 26, 27, 42
- 7 KOSOW, I. L. *Máquinas elétricas e transformadores*. [S.l.]: Globo, 1979. 25, 27, 42
- 8 JUNIOR, F. J. D. M. G. *Regulador de tensão para sistemas de excitação brushless - desenvolvimento e aplicação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2007. 30
- 9 ANDERSON, P.; FOUAD, A. *POWER SYSTEM CONTROL AND STABILITY, 2ND ED*. [S.l.]: Wiley India Pvt. Limited, 2008. (IEEE Press power engineering series). ISBN 9788126518180. 30
- 10 BERNARDES, D. F. *7º RELATÓRIO MENSAL DE ACOMPANHAMENTO*. [S.l.], 2014. 37, 43
- 11 BERNARDES, D. F. *8º Relatório de acompanhamento do projeto de P&D*. [S.l.], 2014. 43
- 12 BERNARDES, D. F. *9º Relatório de acompanhamento do projeto de P&D*. [S.l.], 2014. 43
- 13 BERNARDES, D. F. *10º RELATÓRIO MENSAL DE ACOMPANHAMENTO*. [S.l.], 2014. 43
- 14 BERNARDES, D. F. *27º RELATÓRIO MENSAL DE ACOMPANHAMENTO*. [S.l.], 2016. 58
- 15 BERNARDES, D. F. *28º Relatório de acompanhamento do projeto de P&D*. [S.l.], 2016. 58

-
- 16 BERNARDES, D. F. *29º Relatório de acompanhamento do projeto de P&D*. [S.l.], 2016. 58
- 17 BERNARDES, D. F. *1º Relatório de acompanhamento do projeto de P&D*. [S.l.], 2013. 59, 60, 61, 62, 63
- 18 BERNARDES, D. F. *3º Relatório de acompanhamento do projeto de P&D*. [S.l.], 2014. 63