



**XXIII SNPTTE  
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(\*)**  
CPFL GERAÇÃO

**Délvio F. Bernardes**  
SD SOLUÇÕES

**José G. Beffa**  
SD SOLUÇÕES

**Marcelo A. R. Junior**  
EPASA S.A.

**Marcelo Y. Kurokawa**  
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.

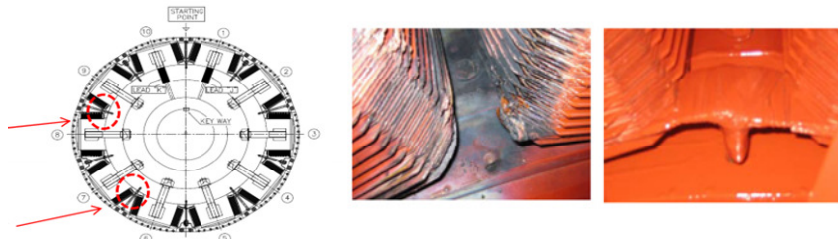
**PALAVRAS-CHAVE**

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, nº 1007 – apto. 121 - Bloco 13 – CEP 13.212-070 Jundiaí, 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

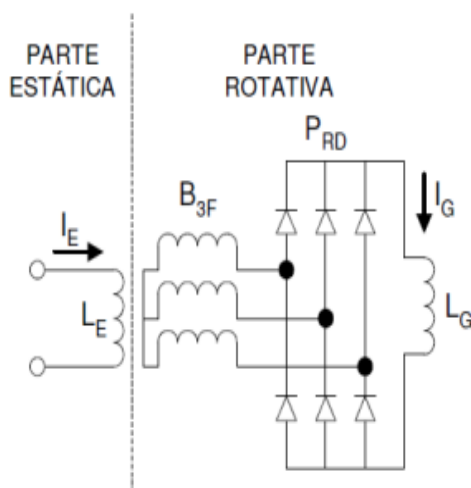
Para chegar ao resultado esperado, a pesquisa do projeto incluiu a realização de uma busca na literatura por soluções semelhantes que já houvessem sido utilizadas, o levantamento das características operacionais dos geradores através de ensaios realizados em campo, o desenvolvimento da análise matemática 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  $120^\circ$ . 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.

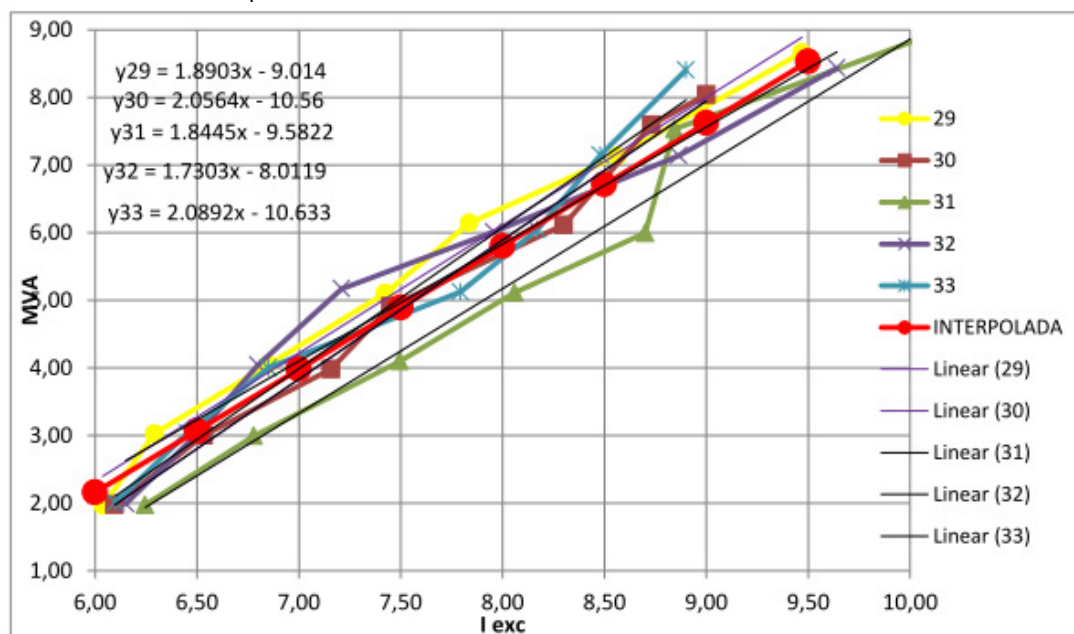


FIGURA 3 – Curvas características dos geradores operando em carga

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

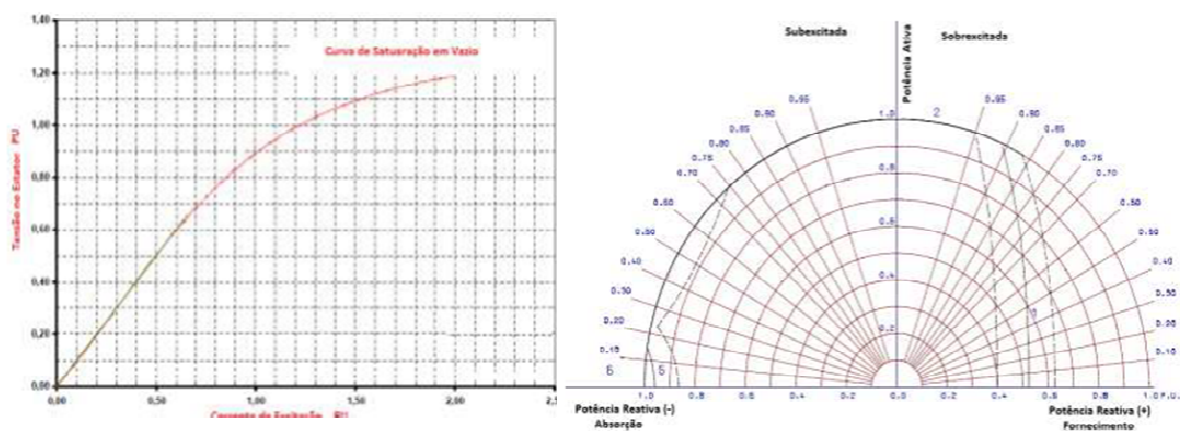


FIGURA 4 – Curvas de saturação em vazio e de capacidade dos geradores

#### 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

<b>Cálculos Iniciais</b>	
<b>Variável</b>	<b>Descrição</b>
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

<b>Variáveis de Entrada</b>	<b>Modelagem</b>	<b>Falha/Defeito</b>
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

<b>Falha/Defeito</b>	<b>Regras</b>	<b>Mapeamentos</b>
Falha no Campo da Excitatriz	Regras FCEXC	Curto entre espiras
		Curto entre pólos
		Falhas na conexão
		Sobretensão
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
		Sobretensão
		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		
Ir		
Vt		
Irotor	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.

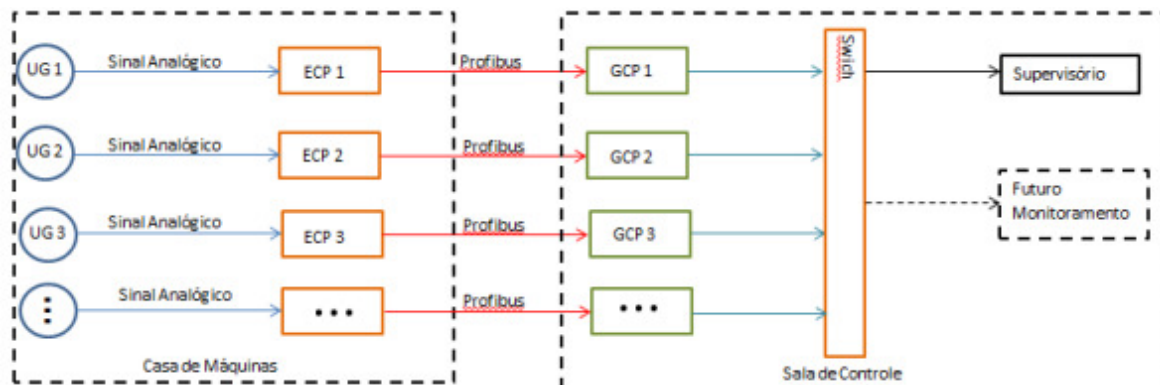


FIGURA 5 – Arquitetura de comunicação do projeto na usina

## 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.