



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO -1**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**SOLUÇÃO PARA MEDIÇÃO DA CORRENTE NA BOBINA DE CAMPO EM GERADORES COM EXCITAÇÃO BRUSHLESS**

**Prof. Dr. Délvio Franco Bernardes  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**RESUMO**

Com o objetivo de solucionar os problemas inerentes aos sistemas de medição de corrente do enrolamento do rotor de geradores com excitação *brushless*, este trabalho apresenta um sistema inovador de medição desta corrente. A principal motivação para o desenvolvimento do sistema consiste nos benefícios obtidos com uma medição eficaz da corrente do rotor do gerador. Assim sendo, o trabalho apresenta o princípio de funcionamento do sistema de medição, a arquitetura do sistema, os desenhos de projeto, bem como os resultados dos ensaios de validação.

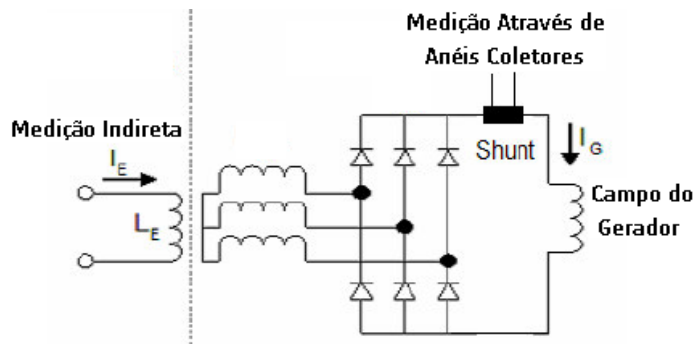
**PALAVRAS-CHAVE**

Sistema de Excitação, Brushless, PCH.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O sistema de excitação *brushless* (sem escovas) é uma solução técnica e economicamente atrativa para determinadas aplicações de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). Com o aumento expressivo da quantidade destas centrais implantadas no Brasil nos últimos anos, é possível encontrar uma grande quantidade de geradores com este tipo de excitação operando no sistema elétrico brasileiro. Do ponto de vista econômico, para geradores operando em determinadas faixas de potência e rotação, o custo de implantação da excitação *brushless* é inferior ao do sistema estático, conforme estudos realizados por fabricantes do setor de hidrogeração [1].

Apesar de todos os benefícios econômicos inerentes ao sistema *brushless*, para que se possa torná-lo ainda mais atrativo (do ponto de vista técnico), os problemas relacionados à medição de corrente do rotor do gerador devem ser superados, tendo em vista que os métodos usualmente empregados apresentam imprecisões significativas. Atualmente, a medição de corrente é realizada de maneira indireta, pelos terminais da excitatriz ou através de um resistor *shunt* conectado a um par de anéis coletores, conforme ilustrado na Figura 1 [2].



**FIGURA 1 – Método Convencional de Medição**

Ambas as medições não representam fielmente o comportamento da corrente do rotor do gerador. Com a dificuldade de se obter medições precisas da corrente do rotor do gerador, o cálculo da temperatura do enrolamento dos pólos não é confiável, impossibilitando o monitoramento das condições térmicas reais das bobinas polares.

A ineficiência das metodologias empregadas para a medição de corrente, também torna inviável a obtenção das condições de saturação do gerador em vazio e em carga, não permitindo uma análise dinâmica do comportamento eletromagnético do gerador.

Assim sendo, este trabalho apresenta um novo medidor de corrente do rotor de gerador com excitação *brushless*, o qual realiza as medições de maneira direta e com um elevado grau de confiabilidade. Conforme está apresentado no trabalho, o equipamento é uma solução inédita, a qual pode ser aplicada aos novos geradores, bem como aos já conectados no sistema.

## 2.0 - DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

De um modo geral, o sistema de medição desenvolvido está fundamentado em três princípios magnéticos: concatenação de linhas de fluxo, variação de relutância e tensão induzida (Lenz-Faraday), conforme está abordado nos dois itens subseqüentes.

### 2.1 Princípio de Funcionamento

Conforme citado, o fenômeno da concatenação de linhas de fluxo magnético é um princípio físico que alicerça a fundamentação teórica do equipamento desenvolvido. De acordo com o desenho apresentado na Figura 2, o fluxo magnético, criado pela circulação de corrente no barramento do rotor do gerador, é concatenado através de duas ferraduras magnéticas, denominadas Ferradura Móvel e Ferradura Estática.

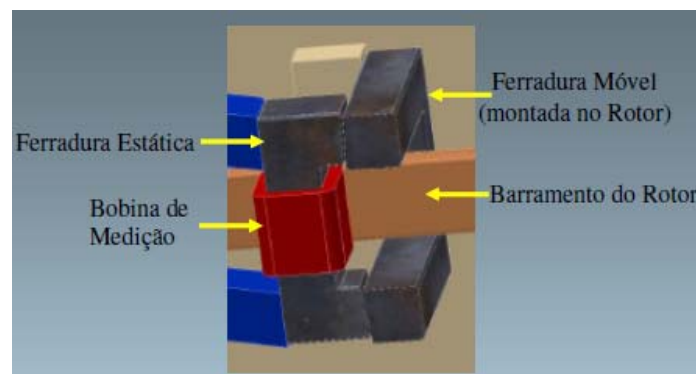


FIGURA 2 – Sistema de Medição Proposto

De acordo com a ilustração apresentada na Figura 2, a ferradura móvel envolve o condutor (barramento do rotor). Este barramento quando percorrido pela corrente de campo, produz um fluxo magnético contínuo que é fechado através das extremidades desta ferradura. Na passagem da ferradura móvel pela ferradura estática ocorre uma variação do meio magnético e da distribuição das linhas de fluxo, que passam a ser concatenadas não mais pelo ar e sim pela ferradura estática.

A variação do fluxo magnético, provocada pela variação do meio, é proporcional à velocidade de passagem da ferradura móvel, à propriedade magnética e à geometria das ferraduras. Esta variação induz uma tensão elétrica na bobina de medição proporcional à corrente do barramento de excitação, viabilizando o cálculo desta corrente.

A tensão medida na bobina é tratada analogicamente por um circuito eletrônico dedicado, que condiciona o sinal de tensão que é disponibilizado na entrada analógica de um Controlador Lógico Programável (CLP), conforme abordado na seção 3.0. Este sinal é tratado por um *software* dedicado, que calcula e disponibiliza os valores de corrente e temperatura dos pólos do gerador e, também, apresenta para o Sistema Digital de Supervisão e Controle (SDSC) aviso de falhas no sistema de excitação. O envio das grandezas calculadas e do aviso de falhas será realizado digitalmente através de protocolo de comunicação compatível com o SDSC da usina.

### 2.3 Modelagem Matemática Através de Elementos Finitos

Com o objetivo de avaliar o comportamento das linhas de fluxo do sistema apresentado na seção anterior, foi realizada a modelagem matemática através da técnica de elementos finitos. A partir da implementação do modelo matemático, foi possível avaliar o comportamento dinâmico das linhas de fluxo, conforme apresentado na Figura 3.

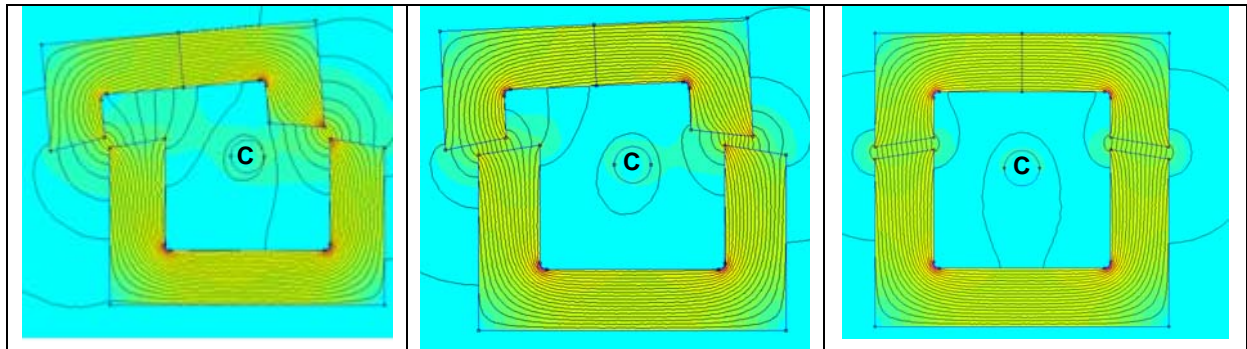


FIGURA 3 – Modelagem em Elementos Finitos

Ao analisar a Figura 3 é possível verificar a distribuição das linhas de fluxo em três instantes distintos, os quais representam a ferradura móvel se deslocando em direção à fixa até o fechamento completo de ambas através do entreferro. Conforme pode ser observado, o condutor, que está identificado por **C**, gera um fluxo magnético contínuo que é concatenado pelas ferraduras. No entanto, durante o cruzamento das ferraduras ocorre uma variação do meio magnético e da distribuição das linhas de fluxo, induzindo tensão na bobina de medição montada na ferradura fixa.

### 2.4 Validação do Desenvolvimento

Para a validação do protótipo desenvolvido, foram realizados ensaios em uma bancada desenvolvida especificamente para os testes com o medidor. Através dos ensaios de validação, foi possível avaliar os resultados obtidos através do cálculo de elementos finitos, comprovando na prática as respostas obtidas pelo método matemático aplicado. Assim sendo, as Figuras 3 e 4 apresentam os gráficos da tensão induzida na bobina e do fluxo magnético, respectivamente.

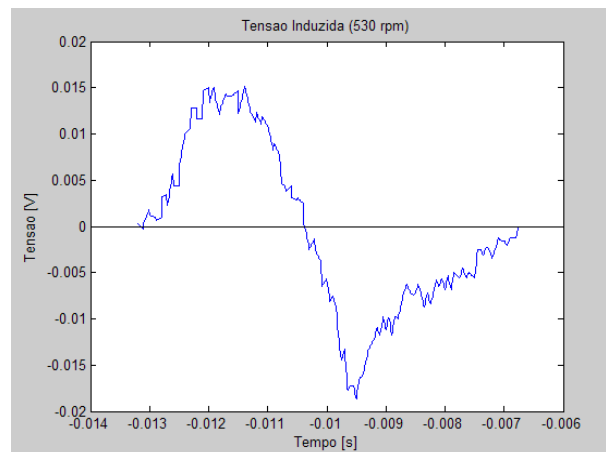


FIGURA 3 – Forma de Onda da Tensão Induzida

Com a utilização de um osciloscópio digital, a forma de onda da tensão induzida foi obtida diretamente nos terminais da bobina de medição instalada na ferradura fixa. A tensão apresentada na Figura 3 corresponde a um ensaio com o rotor girando a uma velocidade de 530 rpm e uma corrente de 100 A.

A partir do cálculo Integral da tensão induzida, foi possível obter a forma de onda do fluxo magnético, dividindo o resultado do cálculo pelo número de espiras da bobina de medição.

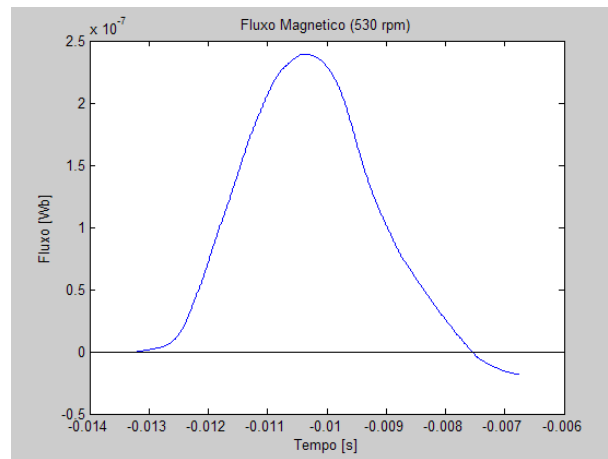


FIGURA 4 – Forma de Onda do Fluxo Magnético

Conforme esperado, ao iniciar o a concatenação do fluxo através do fechamento das ferraduras, o fluxo magnético tem seu valor aumentado até o instante em que as fechaduras se fecham completamente pelo entreferro. Após o fechamento, as ferraduras começam a se distanciar até a interrupção total da concatenação de fluxo magnético. A forma de onda apresentada na Figura 4 retrata este comportamento, comprovando na prática o princípio magnético utilizado no desenvolvimento apresentado neste artigo.

Além dos ensaios de obtenção da forma de onda, foram realizadas medições do valor eficaz da tensão para diferentes valores de entreferro, conforme apresentado no gráfico a seguir.

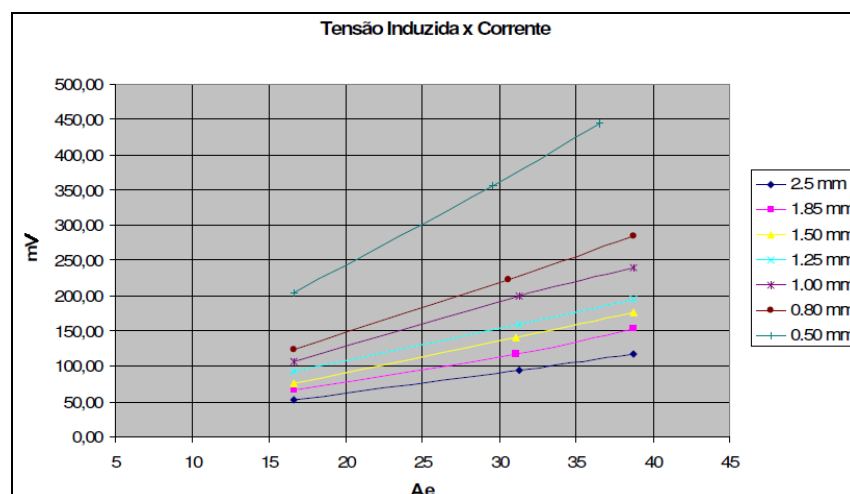


FIGURA 5 – Variação do Entreferro

De acordo com o gráfico, é possível verificar que a linearidade entre o valor de corrente em Ampere-Espira ( $A_e$ ) é mantida para os valores de entreferro calibrados para o teste, os quais estão apresentados na legenda do gráfico. Com isso, ao ser comprovada a manutenção da linearidade, foi possível verificar que dentro da faixa de valores utilizada no teste é possível definir qualquer valor de entreferro.

É importante ressaltar que o valor de entreferro utilizado influencia diretamente na equação que relaciona o valor da corrente do rotor e a tensão induzida na bobina de medição. No entanto, uma vez conhecida a geometria do circuito magnético, a equação pode ser implementada para qualquer valor de entreferro.

### 3.0 - APLICAÇÃO DO SISTEMA

Após a realização dos cálculos matemáticos e dos ensaios em bancada experimental, a próxima etapa do desenvolvimento consistiu na definição da metodologia a ser aplicada no tratamento de sinais e na elaboração do projeto de montagem do equipamento no rotor do gerador.

A próxima figura ilustra, de um modo geral, a arquitetura do sistema completo de medição.

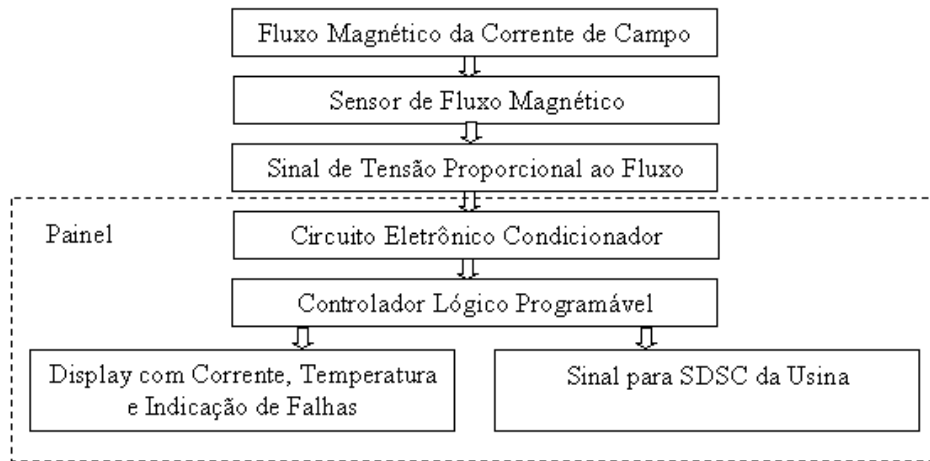


FIGURA 4 – Arquitetura do Sistema

Conforme consta no diagrama de blocos, o sinal de tensão induzido na bobina de medição (sensor de fluxo magnético) é amplificado e condicionado por um circuito eletrônico dedicado, o qual tem a saída conectada à entrada analógica do Controlador Lógico Programável (CLP).

O sinal de tensão disponibilizado na entrada analógica é tratado digitalmente e, através das equações implementadas no software do CLP, os valores de corrente e temperatura do rotor são calculados e disponibilizados no display do painel ou enviados para o Sistema Digital de Supervisão e Controle (SDSC) da usina através de um protocolo de comunicação.

Além dos cálculos de corrente e temperatura do rotor, no software estão implementadas as rotinas de identificação de eventuais falhas no rotor, tais como: defeito na ponte rotativa, curto-circuito, interrupção da corrente de campo, etc.

A arquitetura do sistema apresentada na Figura 4 contempla apenas o funcionamento geral através de um diagrama de blocos simplificado. Uma vez definida a arquitetura do sistema, a etapa subsequente do desenvolvimento consistiu na definição dos projetos das ferraduras e dos sistemas de montagem das estruturas fixa e rotativa. A Figura 5 consiste de um desenho elaborado em três dimensões, que apresenta uma vista geral da montagem da ferradura móvel no rotor do gerador.

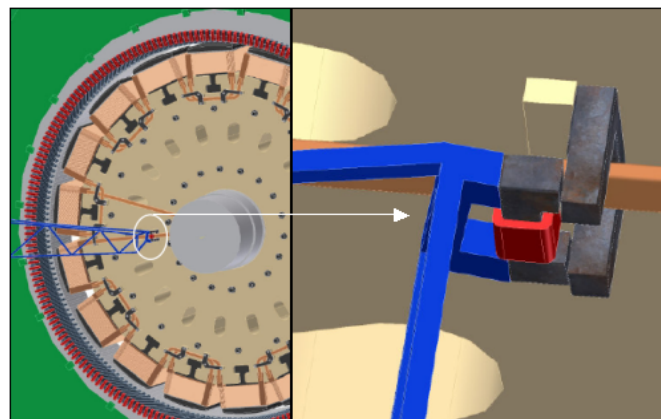


FIGURA 5 – Vista Geral da Montagem do Sistema no Rotor

Conforme pode ser observado na Figura 5, a ferradura montada no anel magnético envolve o barramento de alimentação dos pólos e se mantém distante da ferradura fixa por um entreferro definido em projeto. A ferradura fixa é montada em um suporte que é fixado na carcaça da excitatriz, conforme apresentado nas Figuras 6 e 7.

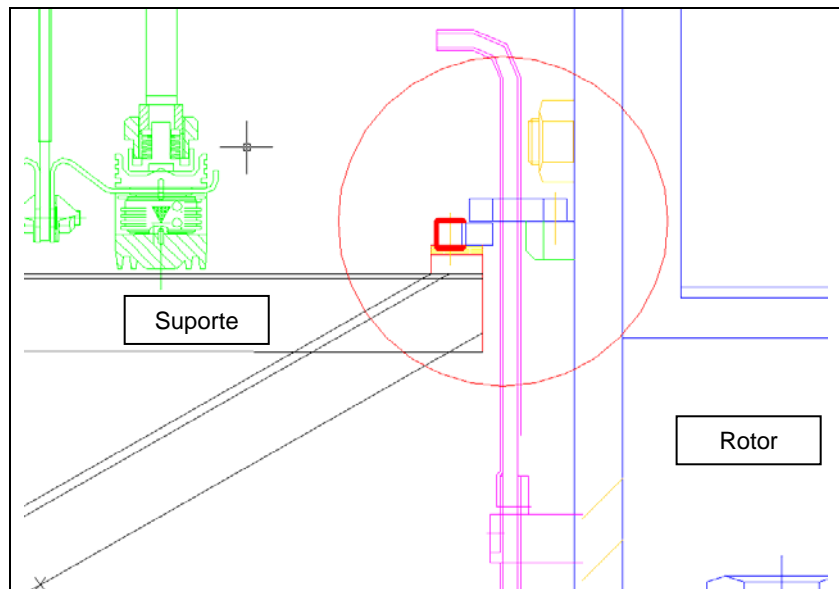


FIGURA 6 – Desenho da Montagem do Sistema no Rotor

A Figura 6 apresenta um desenho de montagem das bobinas fixa e móvel em um rotor brushless de uma PCH real. Conforme comentado, o suporte onde está fixada a ferradura fixa é montado na carcaça da excitatriz, conforme apresentado na Figura 7.

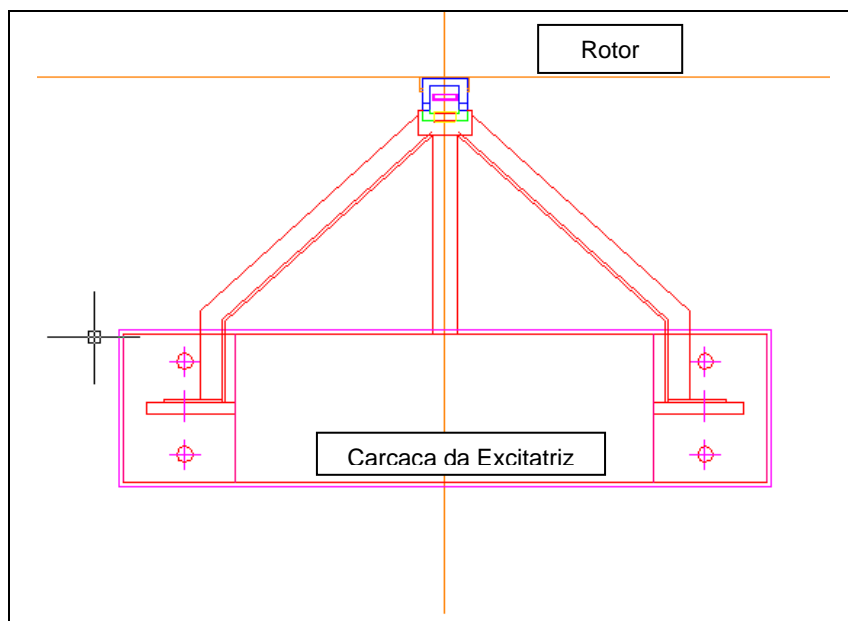


FIGURA 7 – Desenho da Montagem do Apoio no Rotor da Excitatriz

Através dos desenhos de montagem apresentados, é possível verificar que a montagem do sistema de medição é trivial e pode ser realizada sem a necessidade de desmontagens significativas do gerador. Assim sendo, constata-se que o sistema permite ser instalado em um curto intervalo de tempo, não necessitando, desta maneira, paradas longas da unidade geradora.

A próxima seção do artigo apresenta as vantagens obtidas com a realização da medição da corrente do rotor de gerador.

#### 4.0 - VANTAGENS DA REALIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE

O dispositivo apresentado neste trabalho resolve o problema de medição de corrente dos pólos do gerador inerente às metodologias usualmente aplicadas, as quais foram apresentadas na seção 1.

Com boa confiabilidade das medições do dispositivo apresentado, é possível ter um controle eficaz da temperatura do enrolamento dos pólos do rotor do gerador, permitindo a identificação de uma possível deterioração precoce do sistema de isolamento dos pólos. Esta identificação possibilita o planejamento de manutenção preventiva dos pólos, reduzindo o risco de uma parada intempestiva.

A medição da corrente com precisão viabiliza a detecção de eventuais falhas na excitatriz brushless, tais como: defeito em diodos, saturação do circuito magnético da brushless e falhas no sistema de isolamento dos enrolamentos (estator e rotor) da brushless. A detecção destas falhas é feita através da comparação entre as correntes de excitação do campo da brushless e a corrente de excitação dos pólos do gerador.

Vale observar que ao medir a corrente, é possível obter a curva de saturação do gerador através de medições diretas e com elevado grau de confiabilidade, possibilitando o levantamento das características magnéticas do gerador.

## 5.0 - CONCLUSÕES

Conforme abordado no trabalho, na medição através do shunt, o sinal obtido nas escovas de medição possui um nível baixo de tensão e uma relação sinal/ruído desfavorável, prejudicando significativamente a leitura. Na medição indireta, o valor obtido na leitura corresponde à corrente de excitação da excitatriz brushless, não retratando fielmente o valor da corrente de excitação dos pólos do gerador. O cálculo da corrente de excitação dos pólos gerador é realizado através de uma função de transferência linear, não levando em consideração uma possível saturação ou um defeito na excitatriz brushless.

Assim sendo, a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi o fato dos sistemas usualmente empregados possuírem imprecisões significativas na medição da corrente de excitação dos pólos do gerador, que inviabilizam o monitoramento das condições operacionais do enrolamento do rotor. Com o advento da tecnologia de medição apresentada neste trabalho, a medição de corrente do enrolamento do rotor de gerador com excitação brushless se torna viável, permitindo que a corrente e temperatura do enrolamento do rotor sejam obtidas durante os ensaios de validação de potência previstos na Resolução 420 da ANEEL.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) GALVÃO, Francisco J. Di Mase; GARCIA, Fábio; DIAS, Cláudio. Metodologia de Análise dos Prós e Contras das Aplicações dos Sistemas de Excitação Brushless e Estática em PCHs, Artigo publicado no XX SNPTTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, R2009, Recife, Brasil.

(2) GALVÃO, Francisco J. Di Mase. Regulador de Tensão para Sistema de Excitação Brushless – Desenvolvimento e Aplicação, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2007, Brasil.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Professor Délvio Franco Bernardes

Professor do Instituto de Sistemas Elétricos e Energia da Universidade Federal de Itajubá.