

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDO BORTOLOTTI

ESTUDO TÉRMICO DA EXCITATRIZ ESTÁTICA DO
GERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DERIVAÇÃO DO RIO
JORDÃO USANDO SENSORES A FIBRA ÓTICA

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2013

FERNANDO BORTOLOTTI

ESTUDO TÉRMICO DA EXCITATRIZ ESTÁTICA DO
GERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DERIVAÇÃO DO RIO
JORDÃO USANDO SENSORES A FIBRA ÓTICA.

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco. Área de concentração: Sistemas e Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva.

PATO BRANCO

2013

B739e Bortolotti, Fernando

Estudo térmico da excitatriz estática do gerador da usina hidrelétrica derivação do Rio Jordão usando sensores a fibra ótica. – Pato Branco: UTFPR, 2013.
84 f. il. 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Cardoso da Silva

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pato Branco, 2013.

Bibliografia: p. 60-63

1.Sensor a fibra ótica. 2. Redes de Bragg. 3.Tiristor. 4.Ponte retificadora trifásica controlada. I. Silva, Jean Carlos Cardoso da, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.. Título.

CDD 22.ed. 621.3

Ficha Catalográfica elaborada por: Cleide Bezerra

Bibliotecária CRB 9ª/770

Biblioteca da UTFPR – Câmpus Pato Branco



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n° 024

**Estudo térmico da Excitatriz Estática do gerador da Usina Hidrelétrica
Derivação do Rio Jordão usando sensores a fibra ótica.**

por

Fernando Bortolotti

Dissertação apresentada às quatorze horas do dia treze de dezembro de dois mil e treze, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Linha de Pesquisa – Análise de Sistemas Dinâmicos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcos Vinício Haas Rambo
UTFPR/Ctba

Prof. Dr. Cícero Martelli
UTFPR/Ctba

Prof. Dr. Ivo de Lourenço Junior
UTFPR/PB

Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira
UTFPR/PB

Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo as Silva
UTFPR/Ctba (Orientador)

Prof. Dr. Emerson Giovani Carati
Coordenador do PPGEE

Aos meus pais, José Antônio e Hilda que sempre me incentivam e me apoiam, à minha esposa Samara e minha filha Fernanda que estão sempre ao meu lado me ajudando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que permitiram que este trabalho fosse realizado, certamente não conseguirei listar todas as pessoas que fizeram parte dessa importante etapa da minha vida, mas sou eternamente grato.

Agradeço ao Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva pela orientação deste trabalho, pelo entusiasmo que me motivou nos momentos difíceis, pelo aprendizado durante o curso de mestrado e apoio nos ensaios realizados.

A todos do PPGEE – Pato Branco e em especial agradeço aos Srs. Professor Dr. Cícero Martelli, Professor Dr. Hypolito José Kalinowski, Kleiton Moraes e Souza, Uilian José Dreyer e Werner Probst pelas discussões, aquisição e análise dos experimentos.

Agradeço à COPEL – Companhia Paranaense de Energia pelo apoio e incentivo.

Agradeço aos pesquisadores e professores da banca pelas contribuições e pela atenção prestada.

Finalmente agradeço à minha família, que sem o apoio e paciência deles não seria possível vencer mais este desafio.

RESUMO

BORTOLOTTI, Fernando. **ESTUDO TÉRMICO DA EXCITATRIZ ESTÁTICA DO GERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DERIVAÇÃO DO RIO JORDÃO USANDO SENSORES A FIBRA ÓTICA**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica e Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

Este trabalho tem como objetivo compreender o comportamento térmico da excitatriz estática da Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão (UHEDRJ), empregando redes de Bragg em fibra ótica como sensor de temperatura. São apresentados os componentes da excitatriz estática, com foco na ponte retificadora trifásica controlada a tiristores. Com a calibração pôde-se conhecer os erros e incertezas dos sensores, tendo as maiores contribuições de incerteza devidas à dispersão das amostras e ajuste das curvas pelo método dos mínimos quadrados.

A instrumentação da excitatriz estática permite que sejam realizados ensaios em diversas condições de operação da unidade geradora: partida da unidade, excitação a vazio, ou seja, com o gerador energizado, mas sem estar conectado ao sistema elétrico; excitada e sincronizada, ou seja, gerador energizado e sincronizado com o sistema elétrico; rampa de carga até a carga nominal e parada da unidade.

Os ensaios realizados permitem estimar o comportamento térmico da ponte retificadora, variações de temperatura de cada tiristor no painel e como ocorrem as dissipações térmicas.

Palavras-chave: Tiristor, ponte retificadora trifásica controlada, sistema de excitação, excitatriz estática, instrumentação optoeletrônica, redes de Bragg, sensor a fibra ótica.

ABSTRACT

BORTOLOTTI, Fernando. **THERMAL STUDY OF GENERATOR STATIC EXCITER IN HYDROELECTRIC RIO JORDÃO USING OPTICAL FIBER SENSORS**. Dissertation – Electrical Engineering Graduate Program, Federal Technological University of Paraná, Pato Branco, Brazil, 2013.

This work aims to study the static exciter thermal behavior of the hydroelectric power plant Rio Jordão (UHEDRJ) using fiber Bragg gratings as temperature sensor. The components of the static exciter are presented, with a focus on three-phase thyristor controlled bridge rectifier. The calibration allows knowing the errors and uncertainties of the sensors and the greatest uncertainty contributions due to dispersion of the samples and adjusting the curves by the method of minimum squares.

The static exciter instrumentation allows performed the tests in various operating conditions of the generating unit: starting unit, excitation empty (with the generator energized but not connected to the grid); excited and synchronized (energized and synchronized with the power grid), ramp load to rated load and the unit stopped.

The tests allow to estimate the thermal behavior of the bridge rectifier, temperature variations of each thyristor in the panel and how occur the thermal dissipation.

Keywords: thyristor, three-phase controlled bridge rectifier, excitation system, static exciter, optoelectronic instrumentation, fiber Bragg gratings, optical fiber sensor.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. FOTOGRAFIAS DA UHEDRJ EM (A) VERTEDOURO E (B) PISO DO GERADOR.	5
FIGURA 2. DIAGRAMA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO (VIGESA, 1996).	9
FIGURA 3. TIRISTOR (A) SÍMBOLO E (B) DIAGRAMA ELÉTRICO EQUIVALENTE A TRANSISTORES (SIMAS, 2013).	10
FIGURA 4. DESENHO ESQUEMÁTICO DA POLARIZAÇÃO DO TIRISTOR (A) CONDUÇÃO E (B) BLOQUEIO (SIMAS, 2013).	10
FIGURA 5. CURVA CARACTERÍSTICA DE UM TIRISTOR (SIMAS, 2013).	11
FIGURA 6. CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO TIRISTOR EM CONDUÇÃO (SIMAS, 2013).	12
FIGURA 7. DIAGRAMA ELÉTRICO EQUIVALENTE DO MODELO TÉRMICO DO TIRISTOR (MOTTO, 1995).	13
FIGURA 8. DIAGRAMA DA PONTE RETIFICADORA.	14
FIGURA 9. GRÁFICO DA CONDUÇÃO DOS TIRISTORES (VIGESA, 1996).	14
FIGURA 10. GRÁFICO DA TENSÃO DE SAÍDA DE ACORDO COM O ÂNGULO DE DISPARO “IDEAL” (VIGESA, 1996).	15
FIGURA 11. GRÁFICO DA TENSÃO DE SAÍDA DA PONTE PARA ATRASO DE 60° (VIGESA, 1996).	16
FIGURA 12. GRÁFICO DA TENSÃO DE SAÍDA DA PONTE PARA ATRASO DE 90° (VIGESA, 1996).	16
FIGURA 13. GRÁFICO DA CORRENTE DE CAMPO DE ACORDO COM A CARGA (VIGESA, 1996).	17
FIGURA 14. GRÁFICO COM A CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DO GERADOR E PONTO DE OPERAÇÃO DO REGULADOR (VIGESA, 1996). ..	18
FIGURA 15. GRÁFICO DA CURVA DE CAPABILIDADE DO GERADOR (WALTER, 2012).	19
FIGURA 16. REPRESENTAÇÃO DO ENCAPSULAMENTO UTILIZADO.	21
FIGURA 17. GRÁFICO DOS ESPECTROS DOS SENSORES.	21
FIGURA 18. GRÁFICO COM A RESPOSTA NO TEMPO DOS SENSORES DE TEMPERATURA PT-100 E FBG.	22
FIGURA 19. DESENHO DO ENCAPSULAMENTO (A) SENSOR FIXO EM AMBOS OS LADOS (B) SENSOR FIXO EM APENAS UM LADO.	24
FIGURA 20. ILUSTRAÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL.	24
FIGURA 21. GRÁFICO DE RESPOSTA DOS SENSORES COM REGRESSÃO LINEAR - TEMPERATURA 0°C A 90°C.	25
FIGURA 22. ILUSTRAÇÃO DOS SENSORES FIXOS À CHAPA DE ALUMÍNIO.	26
FIGURA 23. GRÁFICO DA RESPOSTA DOS SENSORES SOLTOS E FIXOS A UMA CHAPA DE ALUMÍNIO.	26
FIGURA 24. FOTOGRAFIA DA MONTAGEM USADA PARA A CARACTERIZAÇÃO.	28
FIGURA 25. GRÁFICOS DAS INCERTEZAS DEVIDO À REGRESSÃO LINEAR.	31
FIGURA 26. GRÁFICO DA CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES 1 E 2.	33
FIGURA 27. GRÁFICO DA CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES 3 E 4.	34
FIGURA 28. GRÁFICO DA CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES 5 E 6.	34
FIGURA 29. FOTOGRAFIA DO SENSOR FBG INSTALADO NOS DISSIPADORES DE CALOR DOS TIRISTORES NA UHEDRJ.	41
FIGURA 30. GRÁFICO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO.	44
FIGURA 31. RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E CORRENTE DE CAMPO (0 - 6000s).	45
FIGURA 32. CURVA DE AQUECIMENTO (0 - 1000s).	46
FIGURA 33. CURVA DE RESFRIAMENTO (2000 - 3000s).	47
FIGURA 34. AQUECIMENTO NA REGIÃO RAMPA DE CARGA (4500 - 5500 s).	48
FIGURA 35. RELAÇÃO POTÊNCIA ATIVA E TEMPERATURA (4700 - 5900s).	49
FIGURA 36. GRÁFICO DA TEMPERATURA DOS SENSORES - 2ª ETAPA.	50
FIGURA 37. ILUSTRAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DISPOSIÇÃO DOS SENSORES FBGs.	51
FIGURA 38. PONTE RETIFICADORA (A) FOTOGRAFIA E (B) IMAGEM TÉRMICA, UNIDADE PARADA.	52
FIGURA 39. PONTE RETIFICADORA (A) FOTOGRAFIA E (B) IMAGEM TÉRMICA, APÓS ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA.	53
FIGURA 40. GRÁFICO DA TEMPERATURA EM RELAÇÃO À CORRENTE DE CAMPO - 2ª ETAPA.	54
FIGURA 41. GRÁFICO DA TEMPERATURA E CORRENTE DE CAMPO ATÉ A ESTABILIZAÇÃO.	55
FIGURA 42. GRÁFICO DA TEMPERATURA, POTÊNCIA ATIVA E REATIVA.	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. COMPARAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES FBG E PT-100.....	23
TABELA 2. TABELA DAS EQUAÇÕES DE RETA DOS SENSORES.....	35
TABELA 3. MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA CALIBRAÇÃO.....	35
TABELA 4. TABELA <i>T-STUDENT</i>	36
TABELA 5. INCERTEZA TIPO A DEVIDO A DISPERSÃO DAS AMOSTRAS.....	37
TABELA 6. REGRESSÃO LINEAR, MÉDIAS E DESVIOS PADRÕES.	38
TABELA 7. INCERTEZAS DEVIDO À REGRESSÃO LINEAR.....	38
TABELA 8. INCERTEZAS CALCULADAS	39
TABELA 9. INCERTEZAS COMBINADAS.	40
TABELA 10. REGIÕES DE OPERAÇÃO DA UNIDADE GERADORA – 1º ENSAIO.	43
TABELA 11. REGIÕES DE OPERAÇÃO DA UNIDADE GERADORA – 2º ENSAIO.	50
TABELA 12. LISTA DE EVENTOS SSC – UHEDRJ – 28/09/2012.	65
TABELA 13. LISTA DE EVENTOS SSC – UHEDRJ – 05/09/2013 A 09/09/2013.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CLP	Controlador lógico programável
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
FBG	Fiber Bragg Grating
IEEE	Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (Institute of Electrical and Electronic Engineer)
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
O&M	Operação e Manutenção
O&MBC	Operação e Manutenção Baseada em confiabilidade
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PIV	Máxima tensão de condução reversa
pu	Por unidade
rpm	Rotações por minuto
SIN	Sistema Interligado Nacional
SSC	Sistema de supervisão e controle
TP	Transformador de potencial
UHE	Usina Hidrelétrica
UHEDRJ	Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Unidade de medida de corrente – Ampère
C	Capacitância
δx	Resolução
ΔT_j	Variação da temperatura na junção do transistor [K]
E_0	Tensão entre anodo e catodo durante a condução [V]
I_f	Corrente de campo [A]
f	Frequência [Hz]
I_{ef}	Valor eficaz da corrente [A]
I_H	Corrente de manutenção da condução [A]
I_L	Corrente média na carga [A]
I_{med}	Corrente média de anodo [A]
I_T	Corrente média do tiristor [A]
I_w	Fluxo de calor [W/m.K]
ind	Indutivo
k	Fator de abrangência
KT	Capacidade térmica do material dissipador
kVA	Unidade de medida usada para Potência Aparente (soma vetorial entre potência ativa e reativa).
l	Área por onde flui calor entre o componente e o dissipador
λ	Comprimento de onda [nm]
λ_B	Comprimento de onda de Bragg [nm]
Mvar	Unidade de medida de Potência Reativa
MW	Unidade de medida de Potência Ativa
n	Número total de amostras
n_{ef}	Índice de refração eficaz
P	Potência
P_{Dis}	Potência dissipada durante a condução (tiristor)
R	Resistência
RC	Circuito formado por resistor e capacitor
R_0	Resistência em condução
s_k ou $s(x)$	Desvio padrão
T	Temperatura
t	Tempo
T_{Amb}	Temperatura ambiente
$T_{Máx}$	Temperatura máxima
τ_i	Constante de tempo
u	Incerteza padrão
μ	Ângulo de comutação no chaveamento de tiristores

V	Unidade de medida de tensão – Volts
Vcc	Tensão elétrica contínua
Vca	Tensão elétrica alternada
Var	Unidade de potência reativa
Vf	Tensão de campo
Vg	Tensão de saída do gerador
W	Unidade de potência ativa
\bar{x}	Média aritmética de uma amostra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Perspectivas e motivações	1
1.2	Redes de bragg em fibra ótica.....	2
1.2.1	Características das redes de Bragg em fibras óticas	3
1.3	Objetivos	6
1.3.1	Objetivo Geral	6
1.3.2	Objetivos Específicos.....	6
1.4	Organização da Dissertação	7
2	SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE GERADORES ELÉTRICOS.....	8
2.1	Ponte retificadora	10
2.2	Regiões de operação do gerador	17
2.3	Curva de capacidade do gerador	18
2.4	Proteção do sistema de excitação.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1	Desenvolvimento dos Sensores	20
3.1.1	Ensaio de resposta dos sensores.....	22
3.1.2	Ensaio do sensor para avaliação do encapsulamento e medida cruzada	23
3.1.3	Calibração e Caracterização	27
3.2	Instalação dos Sensores na UHEDRJ.....	40
4	RESULTADOS	42

5	CONCLUSÕES.....	57
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	59
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	APÊNDICE A: PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA DISSERTAÇÃO	64
	APÊNDICE B: LISTA DE EVENTOS DO SISTEMA DE SUPERVISÃO – UHEDRJ	65
	APÊNDICE C: DETALHES TÉCNICOS	72
C.1	Tiristor	72
C.2	Resistor de descarga de campo	77
C.3	Disjuntor de Campo	78
C.4	Painel elétrico do regulador de tensão.....	79
C.5	Ventilação forçada	80
C.5.1	Filtro	81
C.6	Dissipadores de calor	81

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma visão geral do sistema elétrico de potência, a importância das usinas hidrelétricas para o sistema interligado, abordando as motivações e desafios de se monitorar dispositivos semicondutores de potência.

1.1 PERSPECTIVAS E MOTIVAÇÕES

O sistema elétrico de potência apresentou profundas transformações: o racionamento de energia, a privatização de empresas estatais, novas regras para concessão e necessidades das concessionárias exigem estudos e melhorias na qualidade, confiabilidade e continuidade de fornecimento de energia. Desta forma, faz-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas de manutenção em usinas hidrelétricas de forma a permitir que o sistema interligado nacional (SIN) opere com alta confiabilidade e baixa taxa de falhas. As novas técnicas de manutenção tendem a determinar desvios do funcionamento de um equipamento antes mesmo de prejudicar suas funções permitindo um planejamento melhor de paradas para manutenção. Estas técnicas são denominadas preditivas e consistem no monitoramento periódico ou contínuo do processo por meio de instrumentação.

Existem diversos sensores utilizados para monitoramento, dentre eles destaca-se os sensores óticos pelas suas características: sensibilidade, tempo de resposta e imunidade à interferência eletromagnética. Sensores óticos são utilizados para monitoramento de variáveis como temperatura, deformação, pressão e vibração, permitindo, desta forma, sua utilização em diversos setores como, por exemplo, na construção civil: pontes, barragens, estruturas em geral (ECKE, 2013). No setor elétrico, os sensores são utilizados em linhas de transmissão, geradores, motores, transformadores e semicondutores de potência (CULSHAW, 2008; BAZZO, 2010; SOUZA, 2013). Existem diversas aplicações, por exemplo, sensores de temperatura FBG foram instalados em geradores (43,2 MW) na UHE Samuel. Os sensores foram posicionados no estator da unidade (ALLIL, 2010). Outro trabalho utilizando sensores a fibra ótica consiste em um protótipo de sensor de alta tensão empregando redes de Bragg. Este protótipo consiste em um sensor FBG de deformação com encapsulamento

de material piezoelétrico que apresenta um deslocamento quando submetido a um campo elétrico, neste ensaio foram aplicadas tensões de até 8440V (ALLIL, 2010). Sensores de temperatura FBG foram instalados em um motor de indução trifásico, comprovando sua aplicabilidade com a validação do modelo elétrico e térmico (SOUZA, 2010). Sensores FBG foram utilizados na usina hidrelétrica de Salto Osório no rio Iguaçu, para medição de temperatura no mancal turbina, estator e trocadores de calor do gerador (SILVA *et al.*, 2012).

1.2 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

O mercado de sensores a fibra ótica está em um estágio de crescimento e ainda é difícil avaliar e prever com precisão seu desenvolvimento. Além disso, os segmentos de mercado são fragmentados devido à variedade de aplicações em sensoriamento remoto e indústrias onde são aplicados. O mercado atual de sensores FBG é principalmente composto por três segmentos principais: 1) Dispositivos sensores (redes de Bragg para aplicações em sensoriamento), 2) instrumentação (dispositivos de interrogação, multiplexadores, sistemas de aquisição de dados, softwares e interfaces gráficas, e 3) integração de sistemas e serviços de instalação (gerenciamento de projetos de engenharia relacionados com a implementação de soluções em sensoriamento).

A demanda mundial atual do volume de sensores FBG está em crescimento constante. O mercado de instrumentação tem crescido progressivamente ao longo dos últimos três anos, em parte devido a uma variedade de projetos com novas fibras. O volume global de equipamentos de interrogação de FBG está estimado em centenas de unidades por ano, com uma taxa de crescimento anual de 20% a 30%. O mercado mundial de tecnologias em sensores óticos no ano de 2010 se situava em um bilhão de dólares por ano (ECKE, 2013).

Sensores a fibra ótica podem ser usados para medir diferentes mensurandos, incluindo temperatura, deformação, pressão, deslocamento, campo elétrico, rotação, posição, vibração, entre outros. No entanto, podem sofrer de sensibilidade cruzada (medição errônea de deformação e temperatura sobrepostas), não oferecendo, dessa forma, resultados claros e confiáveis das grandezas medidas. Da mesma forma podem ocorrer erros nas medições

com sensoriamento ótico em ambientes de altas temperaturas e com características de vibração anormais. Baseado nesses problemas faz-se necessário a realização de estratégias que assegurem a confiabilidade do sistema de monitoramento.

Para garantir resistência mecânica e proteção contra batidas ou deformações é necessário que o sensor a fibra ótica seja encapsulado. No caso específico de medição de temperatura é necessário que o encapsulamento reduza ou elimine a medida cruzada, temperatura e deformação.

A rede de Bragg em fibra ótica consiste em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo ao longo da fibra. Estas modulações provocam uma reflexão, como uma interferência construtiva, em uma banda de reflexão com comprimento de onda dado pela Equação (1).

$$\lambda_B = 2 n_{ef} \Lambda \quad (1)$$

onde n_{ef} consiste no índice de refração eficaz e λ_B o comprimento de onda de Bragg.

1.2.1 Características das redes de Bragg em fibras óticas

Para a fabricação da fibra ótica utiliza-se a sílica, este material apresenta tensores fotoelásticos e termo ótico não nulos, fazendo que as características óticas da rede de Bragg sejam afetadas tanto pela variação de temperatura quanto pela deformação, permitindo que este material seja utilizado como sensor para ambas as grandezas. Desta forma, o deslocamento espectral é dado por (KERSEY, 1997):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial l} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2)$$

Na Equação (2) observa-se que tanto variações devido à deformação (Δl), primeiro termo, quanto variações devido à temperatura (ΔT), segundo termo, definem o deslocamento do espectro. Desprezando-se o efeito da deformação, na Equação (2), tem-se que o deslocamento no comprimento de onda de Bragg devido à expansão térmica ΔT resulta em:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T \quad (3)$$

O coeficiente de expansão térmica é dado pela Equação (4):

$$\alpha_{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \quad (4)$$

Para a sílica tem-se o valor de $\alpha_{\Lambda} = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. O coeficiente termo ótico é dado pela Equação (5):

$$\alpha_n = \frac{1}{n_{\text{ef}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{ef}}}{\partial T} \quad (5)$$

Para a sílica dopada com germânio tem-se o valor de $\alpha_{\Lambda} = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Para um comprimento de onda de Bragg de 1550nm fornece uma sensibilidade de 13,7 pm/°C (OTHONOS, 1999).

O uso de sensores a fibra ótica permitiu a medição de temperatura na junção de materiais semicondutores em dispositivos de potência (BAZZO, 2010), o que até então era considerado impraticável (MARTIN, *et al.*, 2004) (SHEN, *et al.*, 2006) (FUJII *et al.*, 2008). O modelo térmico de um transistor de potência (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor) apresentou divergência de aproximadamente 0,3% em relação aos dados experimentais (BAZZO, 2010). Modelos térmicos elaborados através de técnicas que usavam sensores convencionais apresentaram erros mínimos entre 5% e 10% (SHEN *et al.*, 2006) (BRUKCNER *et al.*, 2007).

O sensor a fibra ótica apresenta diversas características únicas que viabiliza a sua utilização na indústria;

- Imunidade à interferência elétrica: aplicável em locais que apresentam harmônicas em frequências mais elevadas, por exemplo, correntes de chaveamento dos dispositivos semicondutores de potência ou eletromecânicos;
- Material isolante: a fibra ótica por ser isolante é fundamental no uso de aplicações com contato direto a circuitos energizados, como no caso deste trabalho;
- Sensor passivo: O fato de não necessitar de alimentação próxima ao elemento sensor é uma característica extremamente desejável, pois permite a transmissão da informação por dezenas de quilômetros, sem a necessidade de amplificadores de sinal.

O sensor a fibra ótica possui características que viabilizam a instalação em usinas hidrelétricas. Devido à necessidade de se conhecer o comportamento térmico do painel da excitatriz estática, pela equipe de manutenção, importância econômica das pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e pela facilidade de acesso e intervenção da usina, optou-se pelo estudo e instrumentação na Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão (UHEDRJ), localizada na cidade de Reserva do Iguaçu, no estado do Paraná, a 5 km da foz do rio Jordão. Vertedouro em soleira livre, Figura 1 (a), e uma unidade geradora com potência nominal de 6,5 MW, Figura 1 (b). Possui gerador de polos salientes e excitatriz estática digital (controlada por CLP). Sua construção foi iniciada em maio de 1994 e sua conclusão ocorreu em outubro de 1996, entrando em operação em dezembro de 1997.



Figura 1. Fotografias da UHEDRJ em (a) Vertedouro e (b) Piso do Gerador.

Os resultados obtidos neste trabalho servirão como base de comparação para avaliar uma possível degradação, de acordo com a temperatura de funcionamento ou picos de temperatura sobre os semicondutores de potência, bem como, avaliar deficiências nas trocas térmicas por acúmulo de sujeira ou mau contato.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Para que se possa fazer manutenção preventiva no sistema de excitação é necessário que se conheça o comportamento térmico do painel. A ausência de estudos na área de medição de temperatura em retificadores trifásicos controlados e as limitações no uso de sensores convencionais fez-se a necessidade de utilizar instrumentação com redes de Bragg em fibra ótica, para conhecer o comportamento térmico da ponte de tiristores. Os resultados deste trabalho deverão contribuir para um melhor entendimento do sistema de excitação, melhorar técnicas de manutenção e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade do equipamento.

O conhecimento da distribuição térmica no interior do painel em funcionamento normal poderá servir como referência e desvios poderão indicar uma falha ou mau funcionamento do equipamento.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral do trabalho foram estabelecidos objetivos específicos a serem atendidos:

- Desenvolver um encapsulamento para as redes de Bragg em fibra ótica que permita a medição de temperatura sem a influência de outras variáveis como deformação. Este encapsulamento deverá propiciar resistência mecânica sem comprometer o tempo de resposta do sensor;
- Desenvolver plataforma para calibração dos sensores para determinação das incertezas;
- Realizar ensaios nos sensores de forma a comprovar o funcionamento e aplicabilidade em medições na usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão (UHEDRJ).
- Instrumentar a excitatriz estática da UHEDRJ, coletar e condicionar dados;
- Analisar os resultados das medições e compreender as condições operativas e funcionamento da unidade geradora e da excitatriz estática;

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 foram apresentadas as perspectivas, motivações e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a teoria e modo de funcionamento de uma excitatriz estática e sistema de excitação, com ênfase na ponte retificadora trifásica controlada, onde os resultados deste trabalho foram obtidos.

No capítulo 3 é apresentada a forma de gravação dos sensores, caracterização e calibração, concluindo com o processo de instalação dos sensores em campo.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussão dos dados obtidos durante partida da unidade geradora após retorno de manutenção e análise do comportamento do sistema.

No capítulo 5 são realizadas as considerações finais e proposta para trabalhos futuros.

2 SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE GERADORES ELÉTRICOS

O sistema de excitação tem a função de controlar e manter a tensão do gerador em valores pré-determinados, mesmo com oscilação de carga. Deve controlar a tensão de excitação de forma a manter a estabilidade do gerador e o sincronismo com a rede. A tensão terminal em um gerador é induzida pela variação do fluxo magnético no enrolamento de campo. Para velocidade constante, apenas com o controle da corrente de campo é possível controlar a tensão do gerador.

A tensão alternada da saída do gerador fornece energia elétrica ao transformador de excitação, cuja função é reduzir a tensão a valores compatíveis com o da tensão de excitação, em seguida esta onda é retificada pela ponte trifásica controlada por tiristores. A excitatriz por ser alimentada pelo próprio gerador é chamada de autoexcitada, desta forma é necessário fornecer energia ao campo com uma fonte externa e após alguns segundos o próprio gerador será capaz de suprir a energia necessária para a excitação. Este processo chamado pré-excitação é iniciado quando a rotação ultrapassa 95% da rotação nominal. A fonte utilizada é proveniente de carregadores de baterias, linha externa ou gerador diesel. Quando da ausência das demais fontes, utiliza-se o banco de baterias. O processo de pré-excitação é concluído A tensão de saída subirá em resposta à corrente aplicada de acordo com a resposta de saturação a vazio e no momento que atingir 70% da tensão nominal é concluído o processo de pré-excitação.

Para se manter os tiristores na temperatura adequada, utilizam-se três ventiladores com filtros que tem a função de reduzir a entrada de poeira no interior do painel. O ar circula sobre os tiristores, fusíveis e barras de conexão.

Na Figura 2 é mostrado o diagrama do sistema de excitação, que consiste em: regulador de tensão, ponte retificadora a tiristores, transformador de excitação, disjuntor de campo e resistor de descarga de campo (VIGESA, 1996).

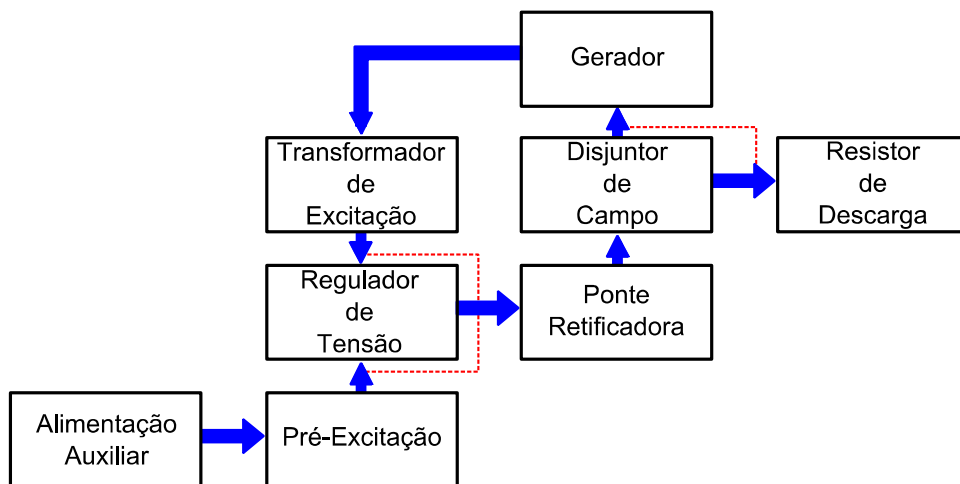


Figura 2. Diagrama do sistema de excitação (VIGESA, 1996).

O transformador de excitação alimenta uma carga com alta reatância (campo) e altas correntes de chaveamento, portanto, com o aumento das harmônicas tem-se o aumento das perdas. Por este motivo, os transformadores devem estar localizados próximos ao regulador de tensão, com ligação por barramentos ou cabos. Normalmente os transformadores de excitação são do tipo seco, trifásico e com resfriamento natural.

O regulador de tensão utiliza uma malha fechada de controle onde a tensão do gerador é comparada a um valor de referência ajustável, esta diferença, ou erro, é amplificada de modo a controlar os pulsos de disparo dos tiristores e desta forma aumentar ou diminuir a tensão.

O disjuntor de campo tem a função de conectar a excitatriz aos anéis coletores do gerador e de desconectar rapidamente de forma a evitar falhas mais graves no gerador ou excitatriz. O disjuntor de campo é formado por dois polos que alimentam o campo do gerador e um terceiro polo para descarga rápida no resistor de descarga de campo.

O resistor de descarga de campo tem a função de descarregar rapidamente a energia armazenada no campo. O valor da resistência é calculado de acordo com a indutância do campo de forma a permitir uma rápida dissipação. O resistor é do tipo linear, formado por fitas/grelhas de aço inox, com alta suportabilidade térmica e durabilidade.

A ponte retificadora transforma corrente alternada, proveniente do transformador de excitação, em corrente contínua. Com o controle desta corrente é possível alterar a tensão terminal do gerador.

2.1 PONTE RETIFICADORA

O principal componente da ponte retificadora é o tiristor, um semicondutor de potência formado por quatro camadas de materiais semicondutores. Na Figura 3 (a) tem-se o símbolo do tiristor, em (b) o circuito elétrico equivalente a transistores (SIMAS, 2013).

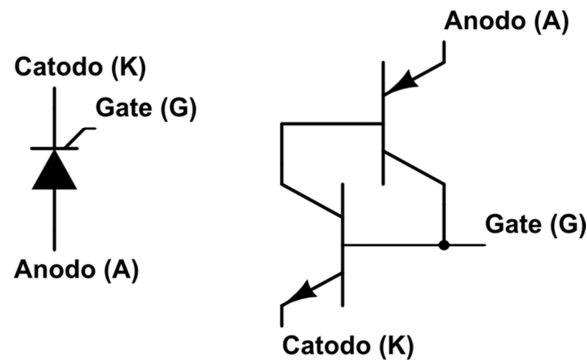


Figura 3. Tiristor (a) símbolo e (b) diagrama elétrico equivalente a transistores (SIMAS, 2013).

O tiristor permite a passagem de corrente em apenas uma direção, do anodo (A) para o catodo (K) e somente após a atuação do gatilho ou “Gate” (G). Para que ocorra a condução é necessário que se tenha uma corrente de gatilho e que o dispositivo esteja diretamente polarizado, ou seja, tenha uma tensão positiva no anodo, conforme ilustra a Figura 4 (a). Para que ocorra o bloqueio é necessário que se inverta a tensão no gatilho, conforme Figura 4 (b).

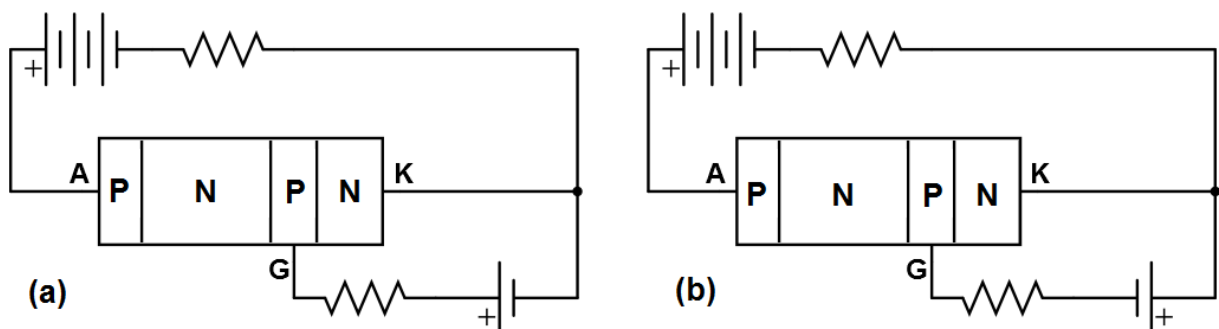


Figura 4. Desenho esquemático da polarização do tiristor (a) condução e (b) bloqueio (SIMAS, 2013).

Para que se mantenha a condução é necessária uma corrente mínima (I_H) circulando entre o anodo e o catodo. Na Figura 5 é possível observar a curva característica volt-ampère de um tiristor. Nota-se que para a polarização reversa há uma tensão que permite a condução. Retificadores trifásicos controlados devem ser projetados para não operar próximo a esta faixa. Normalmente a tensão máxima sobre o componente não deve ser maior que 1/3 da máxima tensão reversa ou *peak inverse voltage* (PIV).

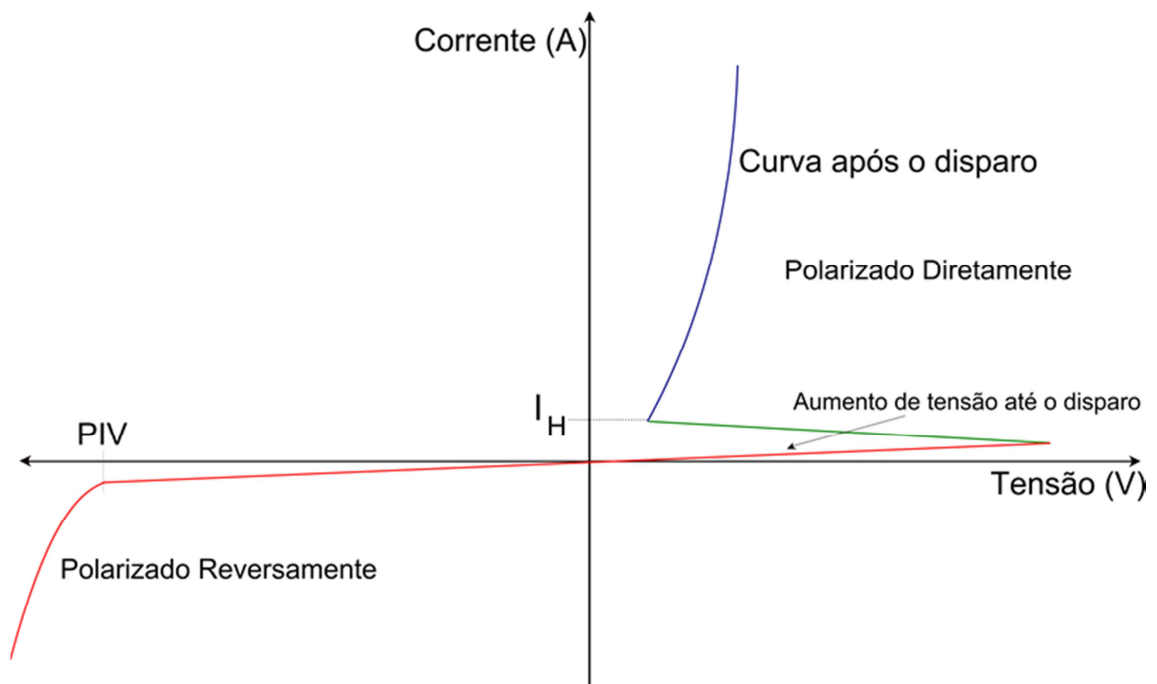


Figura 5. Curva característica de um tiristor (SIMAS, 2013).

Os tiristores não trabalham como “chaves ideais”, na prática possuem limitações como fuga de corrente quando em bloqueio e limitações de condução de corrente devido à resistência elétrica e queda de tensão na barreira de potencial das junções, causando aquecimento do componente. Desta forma, ocorrem perdas por aquecimento tanto em condução como em bloqueio. Em operação as perdas por bloqueio e por acionamento do gatilho são pequenas e normalmente desconsideradas. A maior parcela de aquecimento ocorre durante o período de condução e uma parcela menor durante o chaveamento. Desconsiderando-se as perdas por chaveamento, bloqueio e acionamento do gatilho, o circuito elétrico equivalente pode ser representado conforme Figura 6.

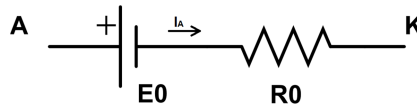


Figura 6. Circuito elétrico equivalente do tiristor em condução (SIMAS, 2013).

A equação que descreve a potência dissipada é dada pela Equação (6) (SIMAS, 2013):

$$P_{Dis} = E_0 \cdot I_{med} + R_0 \cdot I_{ef}^2 \quad (6)$$

sendo P_{Dis} a potência dissipada durante a condução, E_0 a tensão entre anodo e catodo durante a condução, R_0 a resistência em condução, I_{med} a corrente média de anodo e I_{ef} o valor eficaz da corrente de anodo.

Para o dimensionamento dos trocadores de calor utiliza-se a Equação (7) e em aplicações de alta potência utiliza-se um sistema de resfriamento para melhorar a troca térmica.

A capacidade de troca de calor de um dissipador é dada pela Equação (7) (GUIDO, 2010).

$$I_w = \frac{KT}{l \cdot A} \cdot (T_{Máx} - T_{Amb}) \quad (7)$$

sendo I_w o fluxo de calor, KT a capacidade térmica do material dissipador, l a área por onde flui calor entre o componente e o dissipador, A a área de superfície do dissipador com o ambiente, $T_{Máx}$ a temperatura máxima que o componente pode operar e T_{Amb} a temperatura ambiente.

Além da área de contato, limitada devido às dimensões e custos, para que ocorra uma troca térmica adequada deve-se escolher o material que proporcione o melhor custo-benefício. Na maioria dos casos, utilizam-se dissipadores de alumínio, devido a sua boa condutividade térmica, custo e peso reduzidos.

Considera-se que parte do calor gerado é devido a perdas de calor por chaveamento, a temperatura na junção é dada pela equação (8).

$$\Delta T_j = P(t) \cdot Z_{th}(t) \quad (8)$$

Na Figura 7 é mostrado o diagrama do modelo térmico, este modelo se baseia nas características construtivas do tiristor, construído com diversas camadas, um padrão com quatro impedâncias térmicas com constantes de tempo τ_i que determina a resposta de temperatura no tempo.

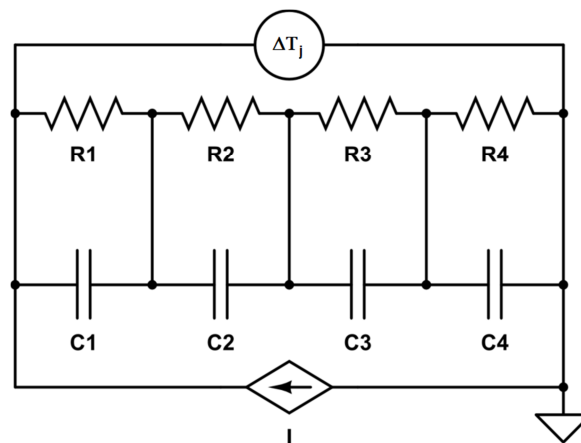


Figura 7. Diagrama elétrico equivalente do modelo térmico do tiristor (MOTTO, 1995).

Este comportamento pode ser modelado por um sistema dinâmico térmico de quarta ordem. A equação que representa o circuito termoeletrico da Figura 7 é dada pela equação (9) (MOTTO, 1995).

$$\Delta T_j = P \cdot \left[R_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + R_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) + R_3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right) + R_4 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_4}} \right) \right] \quad (9)$$

Os tiristores apresentam diversas características que permitem sua utilização em pontes retificadoras, como: operar em altas temperaturas, alta capacidade de condução de corrente, permitir chaveamento em alta velocidade e possuir elevada vida útil quando comparado a dispositivos mecânicos.

A ponte retificadora da UHEDRJ é constituída por seis tiristores com sequência de disparo, conforme Figura 8. Os tiristores 1, 3 e 5 recebem o nome de grupo positivo, pois são disparados durante o semiciclo positivo da tensão de fases às quais estão conectados. Os tiristores 2, 4 e 6 são disparados durante o semiciclo negativo. Para que uma tensão seja aplicada no campo do gerador é necessária a condução de dois tiristores simultaneamente,

um do semiciclo positivo e outro do semiciclo negativo. Neste caso, a tensão aplicada no campo do gerador é dada pela diferença de potencial entre o grupo positivo e o grupo negativo.

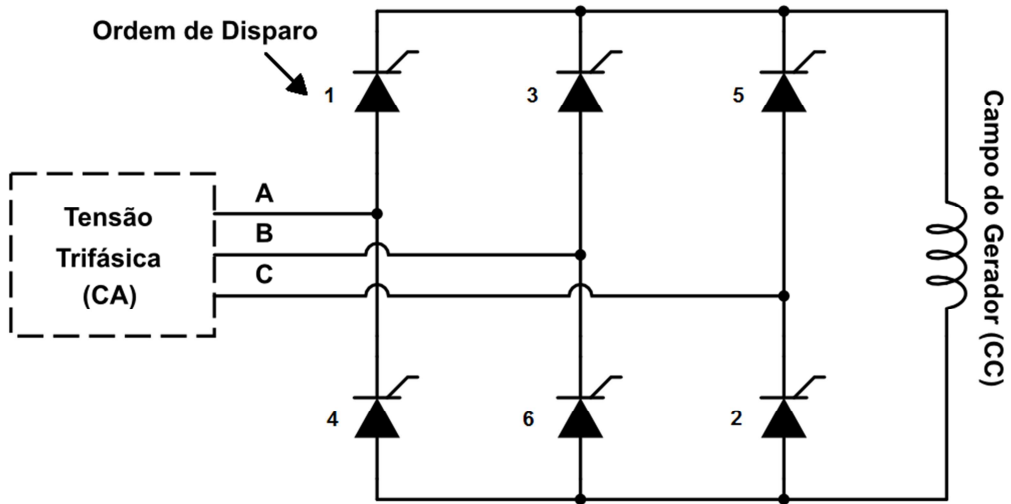


Figura 8. Diagrama da ponte retificadora.

O ângulo de disparo pode ser definido como o ângulo inicial de condução do tiristor. Na Figura 9 há um disparo total da ponte, ou seja, o maior valor de tensão, com ângulo de disparo de 0 grau. Nota-se que cada tiristor da ponte conduz por 120 graus, defasados de 60 graus os grupos positivos e negativos.

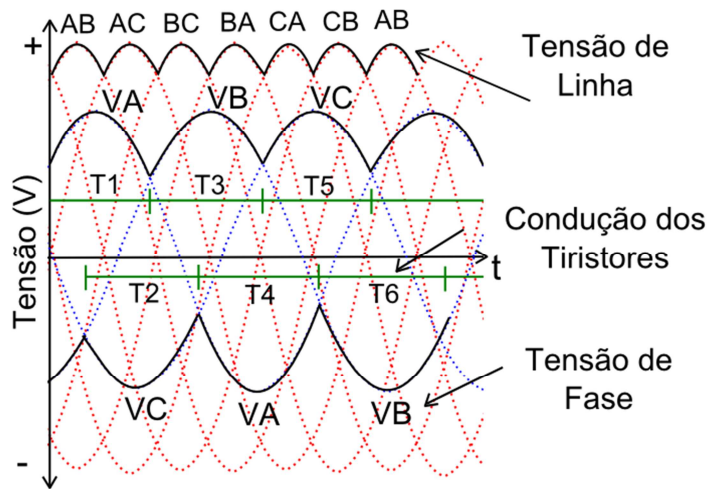


Figura 9. Gráfico da condução dos tiristores (VIGESA, 1996).

Observa-se que a tensão máxima sobre o tiristor, tanto na polarização direta, quanto na polarização inversa é a tensão de linha, ou seja, a diferença de potencial entre duas fases.

Conforme Figura 9 é possível observar que cada par de tiristores conduzem por 1/3 do período, desta forma, a corrente média de cada tiristor é dada pela equação (10).

$$I_T = \frac{I_L}{3} \quad (10)$$

sendo I_T a corrente média do tiristor e I_L a corrente média na carga.

A partir do controle do ângulo de disparo é possível produzir tensões positivas ou negativas. Para tensões e correntes positivas utiliza-se a faixa 0 a 90° e para tensões negativas a faixa 90° a 160°. Na Figura 10 é mostrado o comportamento ideal, onde a reatância de comutação e resistência são desprezadas.

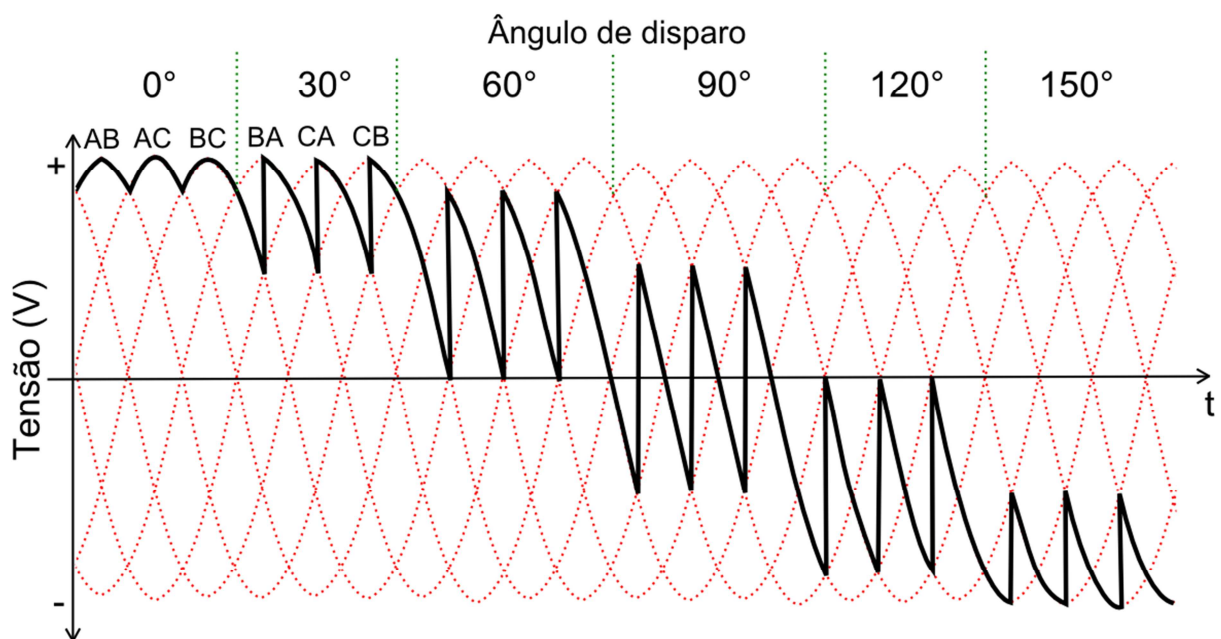


Figura 10. Gráfico da tensão de saída de acordo com o ângulo de disparo "ideal" (VIGESA, 1996).

A comutação consiste na transferência de corrente de um tiristor para outro e não ocorre instantaneamente devido à reatância de comutação, portanto, alguns fatores devem ser observados:

- Na transferência de corrente, durante a comutação, ocorre um atraso em graus, chamado de ângulo de comutação (μ);

- Queda de tensão é proporcional à corrente que está sendo comutada;
- Reatâncias da fonte (transformador de excitação) devem ser consideradas;
- Queda de tensão em “pu” é equivalente à metade do valor de reatância (em “pu”);
- Queda de tensão em “pu” possui o mesmo valor da resistência em “pu”.

Conforme pode se observar nas Figura 11 e Figura 12, a comutação de um tiristor para outro ocorre com perda de energia e distorção na forma de onda, gerando, desta forma, calor e ruído de chaveamento. As características de chaveamento são influenciadas pelo tipo de carga (resistiva, capacitiva ou indutiva) e a distorção proporcional ao valor da carga, ou seja, quanto maior o valor de carga, maior a contribuição da reatância e resistência de comutação e maiores as perdas.

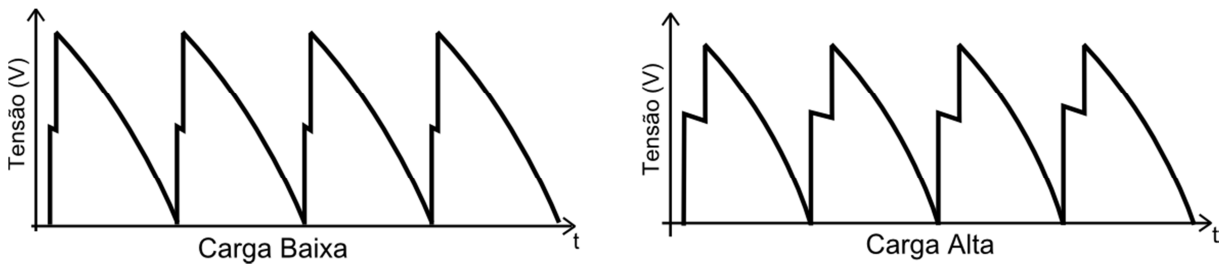


Figura 11. Gráfico da tensão de saída da ponte para atraso de 60° (VIGESA, 1996).

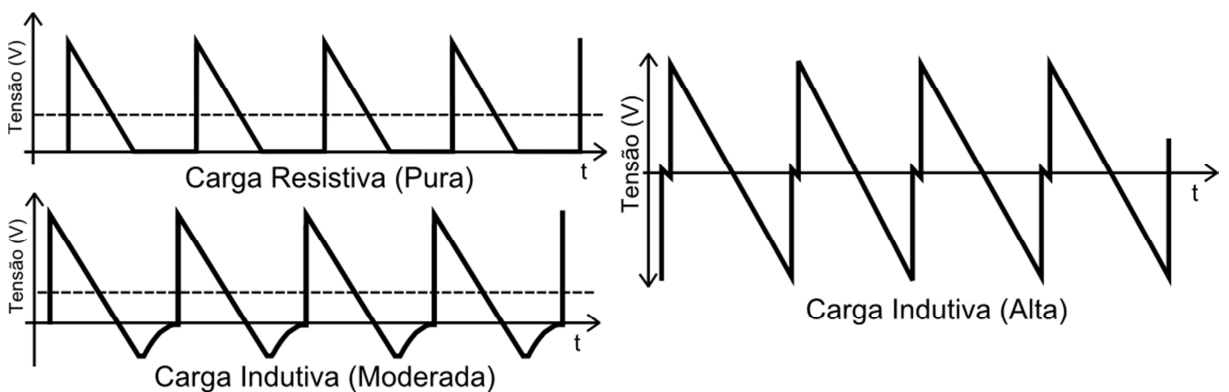


Figura 12. Gráfico da tensão de saída da ponte para atraso de 90° (VIGESA, 1996).

2.2 REGIÕES DE OPERAÇÃO DO GERADOR

A excitatriz possui um controle que responde a variações de carga no gerador alterando as tensões e corrente de campo, de forma a se manter constante a tensão do gerador. As cargas podem ser classificadas em resistivas, capacitivas e indutivas. Para cada uma delas a corrente de campo possui um comportamento, conforme se pode observar na Figura 13 (VIGESA, 1996).

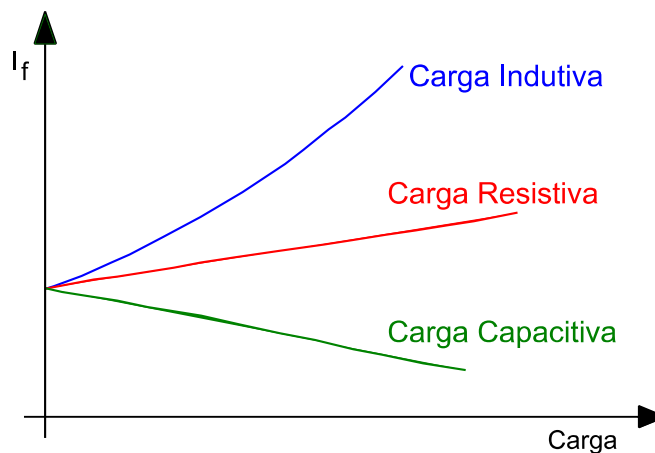


Figura 13. Gráfico da corrente de campo de acordo com a carga (VIGESA, 1996).

Cargas resistivas convertem a energia recebida e não trocam energia com o gerador. As correntes de carga induzem reação na armadura, transversalmente à indução principal, desta forma, não perturba a indução principal. A corrente de excitação tem um aumento linear com o aumento da carga, intensidade baixa, apenas o suficiente para suprir o efeito de saturação e perdas internas das resistências dos enrolamentos.

Cargas capacitivas armazenam energia no campo elétrico e devolvem ao gerador. As correntes de carga provocam uma indução na armadura que se soma com a indução principal, tendo, portanto, que se reduzir a corrente de campo (em relação a vazio). Para cargas capacitivas há uma subexcitação, ou seja, uma redução na corrente de campo para se manter a mesma tensão terminal no gerador.

Cargas indutivas armazenam energia no campo magnético e devolvem ao gerador. As correntes de carga provocam uma indução na armadura que se subtrai a indução principal,

tendo, portanto, que se aumentar a corrente de campo. Neste caso o gerador opera na região sobreexcitada.

A relação entre a tensão do gerador a vazio e a corrente de campo (I_f) possui aspecto da Figura 14. Nota-se que após o ponto de tensão nominal um aumento na corrente de excitação não reflete em um grande aumento da tensão, este comportamento deve-se à saturação dos materiais ferromagnéticos. De forma a facilitar a regulação, os geradores operam no início da faixa de saturação.

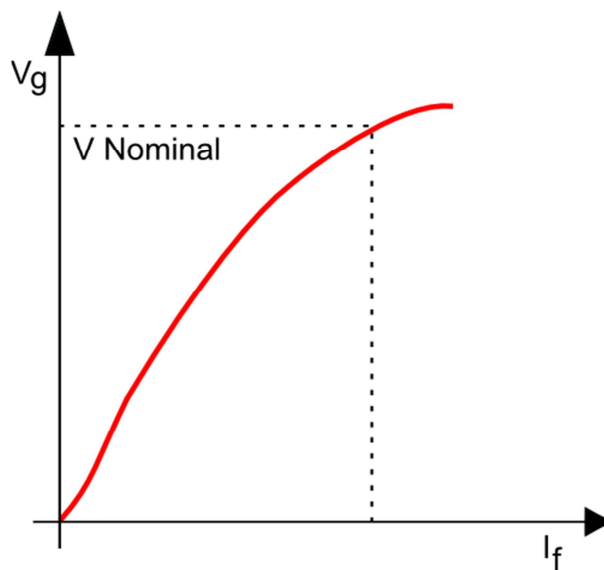


Figura 14. Gráfico com a curva de magnetização do gerador e ponto de operação do regulador (VIGESA, 1996).

2.3 CURVA DE CAPABILIDADE DO GERADOR

A curva de capacidade representa os limites operacionais da máquina, ou seja, a região de segurança que um gerador foi projetado e deve operar. Os limites dos geradores síncronos podem ser divididos em: aquecimento da armadura, aquecimento do enrolamento de campo, potência da turbina, estabilidade, excitação mínima e máxima. O principal responsável pelo aquecimento da armadura é a resistência do enrolamento. Quanto maior a resistência, menor a corrente máxima de fase. Da mesma forma, o aquecimento do enrolamento de campo também sofre aquecimento por perdas ôhmicas. A limitação por

potência da turbina afeta apenas a potência ativa do gerador, pois a energia líquida associada à potência reativa é nula. A limitação por estabilidade é definida pelo ângulo de potência máxima permitida. Este limite pode ser imposto como uma margem de potência em relação à máxima potência teórica. Limite de excitação mínima é definido pela corrente mínima de excitação.

Na Figura 15, a região à esquerda, ou região de subexcitação é limitada pelo limite de aquecimento do estator. A região à direita ou região de sobre-excitação é limitada pelo aquecimento do rotor. A região superior é limitada pelo limite de estabilidade magnética (WALTER, 2012).

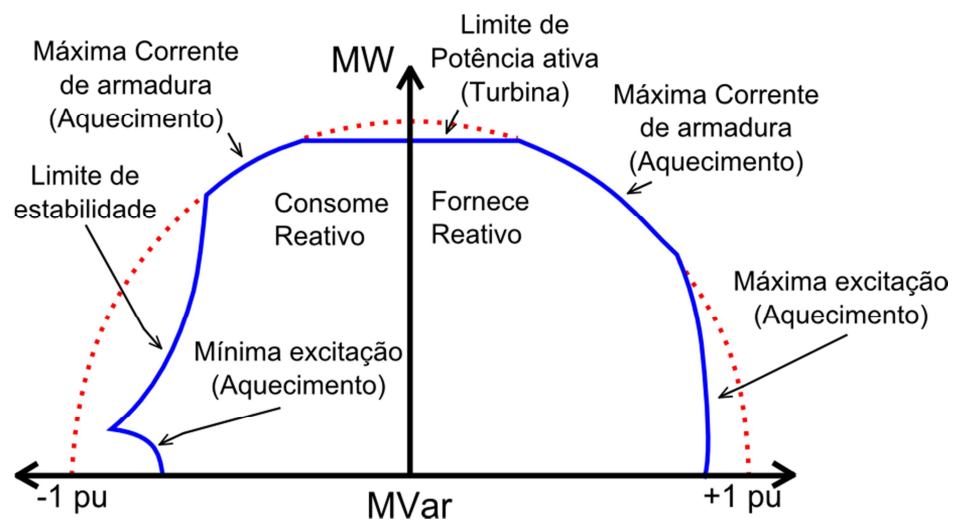


Figura 15. Gráfico da curva de capacidade do gerador (WALTER, 2012).

2.4 PROTEÇÃO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

As proteções tem a função de garantir que os componentes do sistema de excitação não trabalhem fora das condições especificadas e sejam danificados. Na saída do transformador de excitação há uma proteção contra surtos de corrente através de capacitores ligados nas fases e terra. Na ponte retificadora, cada tiristor possui um fusível ultrarrápido para protegê-lo, com indicação de falha de condução e um circuito *Snubber*. A proteção contra sobretensão do campo é realizada por um circuito (*crowbar*) que interliga o resistor ao campo do gerador.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o desenvolvimento dos sensores, encapsulamento, caracterização; e a instalação dos sensores em campo, com a aquisição de dados de temperatura e sinais elétricos do gerador e da excitatriz, corrente de campo do gerador, potência ativa e potência reativa.

3.1 DESENVOLVIMENTO DOS SENSORES

A temperatura é uma grandeza física que pode indicar o comportamento e regiões de operação de um equipamento. Os sensores devem ser sensibilizados pela variação de uma grandeza, como por exemplo, resistência elétrica, tensão elétrica ou comprimento de onda, para que permita identificar o valor medido de forma indireta. A caracterização do sensor consiste na determinação da relação entre a temperatura e comprimento de onda, no caso do sensor FBG.

Para que outras variáveis não interfiram na medição e se realize uma medição adequada, os sensores devem ser protegidos contra a oxidação, vibração e danos, desta forma, faz-se necessário a instalação de um poço ou tubo protetor. A proteção ajuda na estabilidade do sensor e conseqüentemente da medição, mas em contrapartida, funciona como fonte de atraso na leitura de temperatura. Quanto maior for o poço protetor, mais lenta será a resposta do sensor.

O sensor FBG apresenta respostas mais rápidas no tempo, quando comparadas aos sensores elétricos convencionais, devido às dimensões reduzidas e suas propriedades termo óticas. Geralmente a característica que mais influencia na resposta de um sensor ótico, é o tipo de encapsulamento utilizado.

Neste trabalho optou-se pelo uso do sensor a fibra ótica baseado em redes de Bragg, devido às características destacadas anteriormente. O sensor possui sensibilidade à deformação e temperatura. Desta forma é necessário que se faça o encapsulamento adequado, de forma a eliminar a medição cruzada. Um encapsulamento da FBG foi desenvolvido para transmitir a temperatura para o elemento sensor de forma rápida e ao mesmo tempo protegê-lo de deformações mecânicas e vibração. O encapsulamento

utilizado consiste em colocar a parte da fibra ótica em que foi gravada a FBG dentro de um tubo metálico de aço inoxidável com dimensões 0,6 x 25 mm. Os sensores foram colados em ambas as extremidades do encapsulamento, conforme ilustrado na Figura 16.

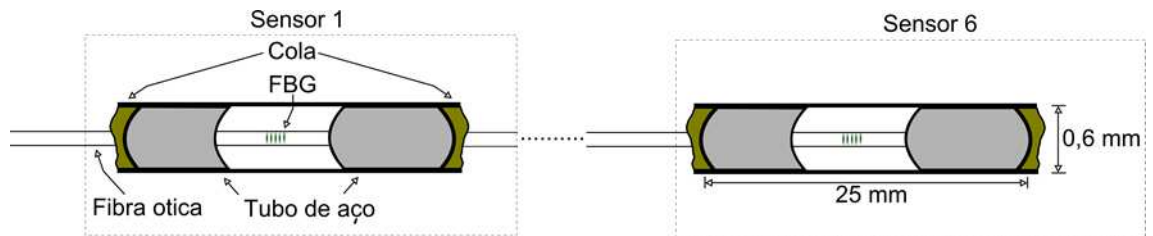


Figura 16. Representação do encapsulamento utilizado.

O sensor consiste em uma fibra ótica monomodo com seis sensores multiplexados em comprimento de onda. No gráfico da Figura 17 é possível observar a resposta em comprimento de onda dos sensores com temperatura de aproximadamente 20°C.

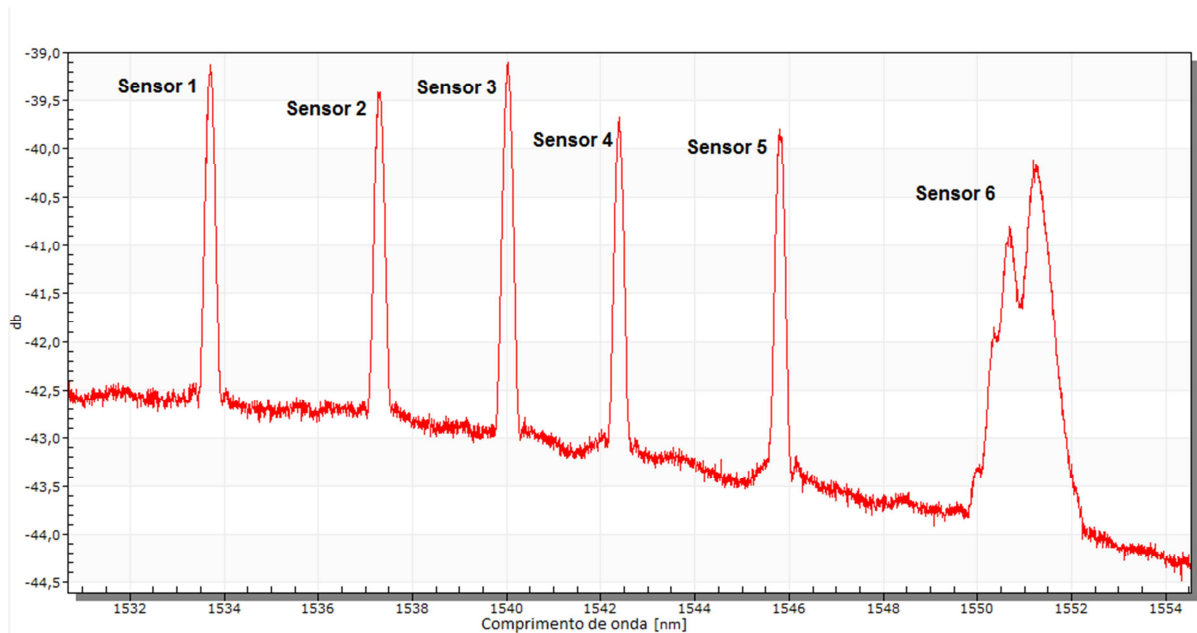


Figura 17. Gráfico dos espectros dos sensores.

3.1.1 Ensaio de resposta dos sensores

O sistema desenvolvido para a avaliação da resposta do sensor em função do tempo consiste em um banho térmico (PolyScience, modelo: 9002A11B) contendo água destilada e temperatura controlada de 35°C, dois sensores: um sensor de temperatura ótico FBG e um sensor elétrico convencional do tipo PT-100 (termoresistência).

Inicialmente, ambos os sensores encontram-se em equilíbrio térmico com o ambiente, com temperatura controlada de 25°C, no instante inicial mergulha-se ambos os sensores no banho térmico cuja temperatura se encontra em 35°C, mede-se ambas as temperaturas em função do tempo, durante 45s.

Na Figura 18 é mostrada a resposta dos sensores após a aplicação de um degrau de temperatura de 10°C, observa-se que o tempo de resposta do sensor a FBG atinge 90% da temperatura no tempo 3,09s e o sensor PT 100 após 15,42s, no tempo 18,51s.

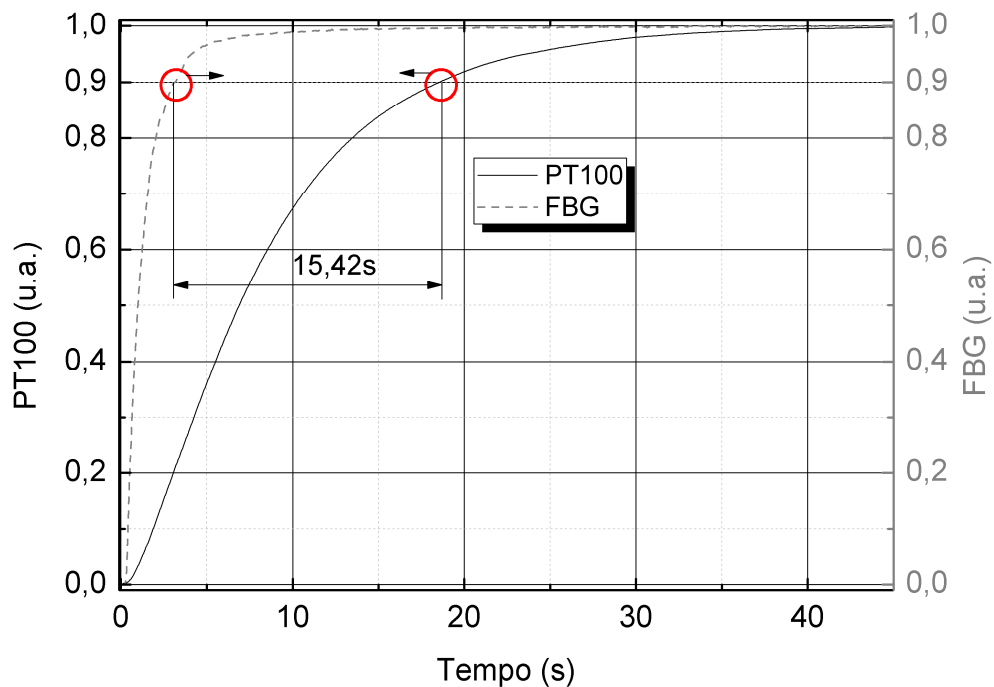


Figura 18. Gráfico com a resposta no tempo dos sensores de Temperatura PT-100 e FBG.

O sensor a fibra ótica possui diversas vantagens, entre elas: permite multiplexação, quase imunidade à interferência eletromagnética, transmissão da informação por dezenas de quilômetros sem circuito de condicionamento de sinal, não necessita de alimentação no local onde o sensor é instalado, reduzido tempo de resposta e excelente linearidade. (KLOE, 2012)

A principal desvantagem do sensor a fibra ótica é o alto custo em instalações com número reduzido de sensores. Para um número elevado, devido à multiplexação, o valor por sensor pode ser menor que para sensores elétricos convencionais.

A Tabela 1 mostra as principais características do sensor FBG comercial e sensor PT-100 (KLOE, 2012).

Tabela 1. Comparação entre as características dos sensores FBG e PT-100

Sensor	Linearidade	Faixa de Temperatura [°C]	Tempo de resposta [0-90%]	Imunidade à interferência	Distância [km]
FBG	Linear	-180 a +300°C	3,09 s	Excelente	50
PT100	Quase Linear	-200 a +650	18,51 s	Boa	0,1

3.1.2 Ensaio do sensor para avaliação do encapsulamento e medida cruzada

O ensaio para a avaliação do encapsulamento e medida cruzada tem como objetivo avaliar se o encapsulamento de aço é adequado para utilização como sensor de temperatura e se a fixação da fibra ótica ao encapsulamento influencia a resposta do sensor. Desta forma, foram desenvolvidos dois sensores de testes, ambos com gravação pelo método de máscara de fases; para o encapsulamento foi utilizado um tubo de aço de dimensões 0,6 x 25 mm. O primeiro sensor foi fixado com cola em ambas as extremidades do tubo. O segundo sensor em apenas uma extremidade deixando a outra extremidade livre, conforme mostra a Figura 19.

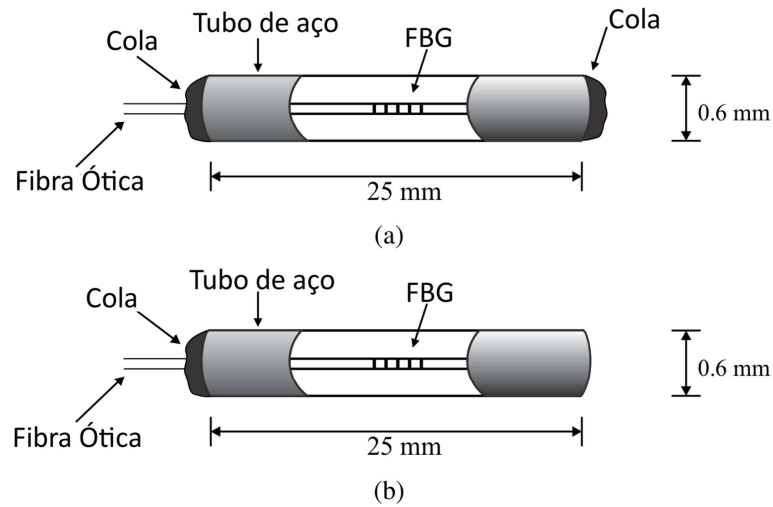


Figura 19. Desenho do encapsulamento (a) sensor fixo em ambos os lados (b) sensor fixo em apenas um lado.

Para avaliação da resposta em função da temperatura dos sensores foi utilizado um arranjo experimental, conforme Figura 20, que consiste no interrogador ótico, termo elemento Peltier com controle digital de temperatura e calibrador de processos.

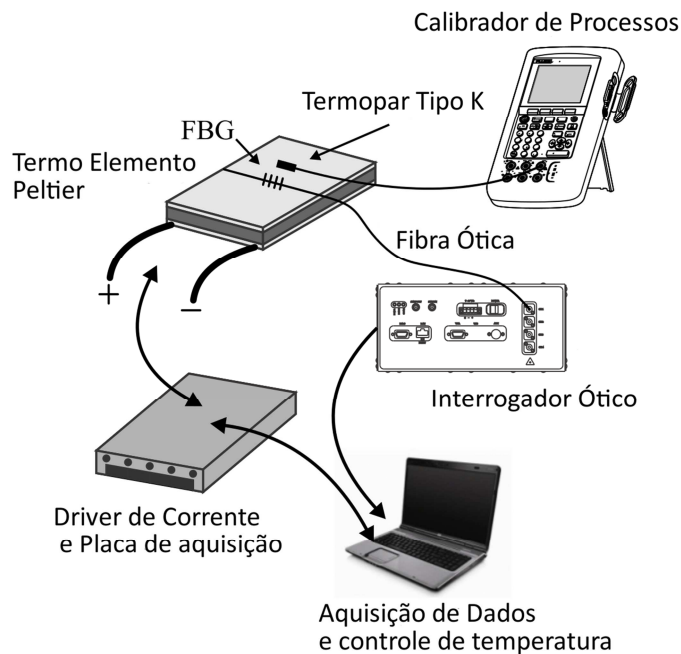


Figura 20. Ilustração do arranjo experimental.

Para a leitura do sensor FBG foi utilizado o interrogador ótico modelo DI 410 da HBM® que possui quatro entradas óticas com taxa de aquisição máxima de 1 kHz e 1 pm de resolução. A gravação dos dados foi realizada pelo programa CatmanEasy – HBM®. Para o ensaio de variação da temperatura no sensor foi utilizado um termo elemento peltier com controle digital de temperatura PID (BAZZO, 2010). Como referência de temperatura foi utilizado o calibrador de processos modelo 743B da Fluke® com sensor termopar tipo K.

Na Figura 21 são apresentados os resultados obtidos na primeira etapa do experimento, cujo objetivo era estudar o comportamento dos sensores quando fixos em ambas as extremidades. Em seguida, avaliar o comportamento quando preso a apenas uma extremidade do tubo. Desta forma foi realizada a variação de temperatura de 0°C a 90°C. Observa-se uma diferença na sensibilidade dos sensores, o sensor 1, fixo em ambos os lados apresentou menor coeficiente angular 0,01215, o sensor 2 apresentou coeficiente angular de 0,01472, estando com cola em apenas um lado do encapsulamento. Este comportamento pode ser o efeito de um pré-tensionamento da fibra no momento da colagem do sensor no encapsulamento. Nota-se que não apresenta sensibilidade cruzada temperatura x deformação.

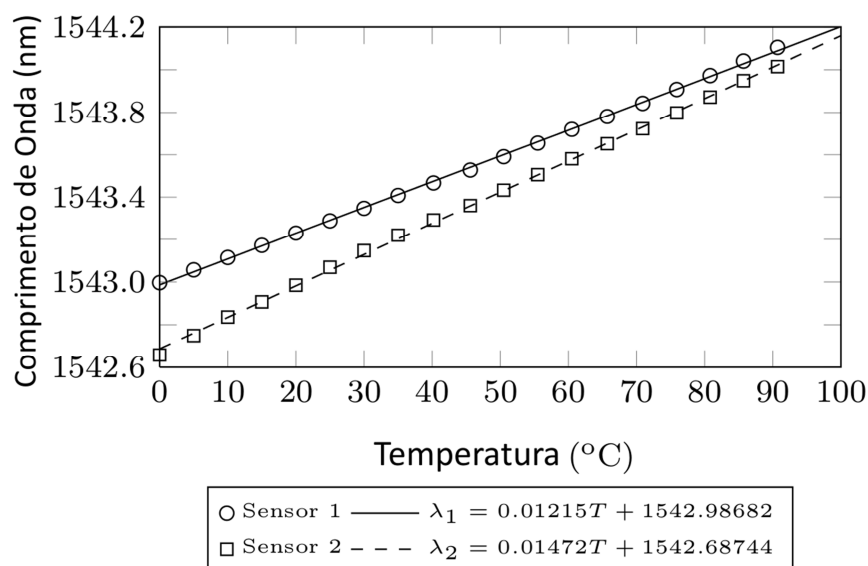


Figura 21. Gráfico de resposta dos sensores com regressão linear - temperatura 0°C a 90°C.

A segunda etapa do experimento foi realizada com o objetivo de analisar resposta do sensor quando colado em outro material, neste caso o alumínio, conforme mostra a Figura 22.

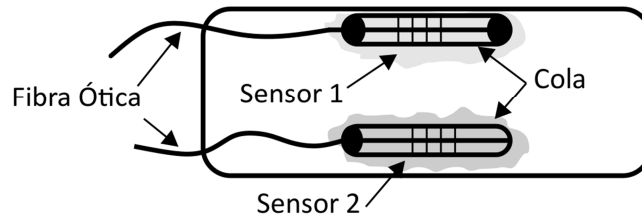


Figura 22. Ilustração dos sensores fixos à chapa de alumínio.

Na Figura 23 são apresentadas as respostas dos sensores soltos e fixos à chapa de alumínio, nota-se que não há variação devido à fixação dos sensores. Durante os experimentos notou-se que a posição do sensor sobre o elemento influenciava na temperatura medida, indicando que a diferença observada deve-se à distribuição de temperatura não uniforme na superfície do elemento térmico.

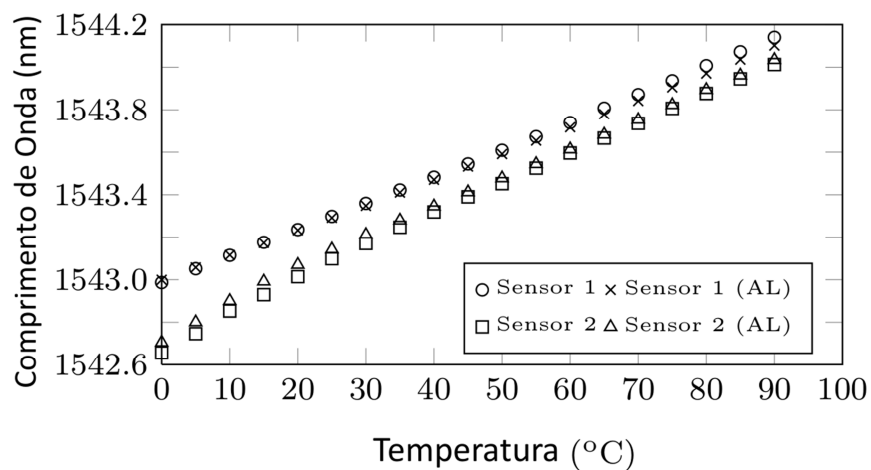


Figura 23. Gráfico da resposta dos sensores soltos e fixos a uma chapa de alumínio.

Desta forma, é possível concluir que o sensor com encapsulamento com tubo de aço não apresenta sensibilidade cruzada nem sofre influência quando fixo a outro material. Neste caso ambos os encapsulamentos estudados podem ser empregados no sensor de temperatura.

3.1.3 Calibração e Caracterização

A caracterização de um sensor de temperatura a fibra ótica consiste em determinar a resposta em comprimento de onda para cada valor de temperatura conhecido. Como este sensor possui uma resposta linear, comprimento de onda pela temperatura, com uma regressão linear dos pontos obtidos experimentalmente é possível estimar o valor de temperatura para qualquer comprimento de onda lido no interrogador ótico.

A calibração consiste na comparação da temperatura com um padrão conhecido, normalmente é feita a calibração em conjunto com a caracterização, neste caso, deve-se utilizar um padrão de temperatura confiável, ou seja, alta repetibilidade, pequenos desvios e incertezas.

Em trabalhos anteriores (BORTOLOTTI *et al.*, 2012), observou-se a importância de se manter constante as condições de temperatura para que não haja interferências durante a caracterização do sensor e com isso o aumento das incertezas e na dispersão das amostras.

Com esta finalidade, para a caracterização, foi utilizado um banho térmico (PolyScience, modelo: 9002A11B) contendo água destilada. Foi desenvolvido um dispositivo para que a água da cuba circule no interior, de forma a manter a temperatura homogênea e constante após estabilização. O dispositivo consiste em um tubo de cobre com diâmetro de 1/8" (0,318 cm), no exterior do tubo de cobre uma mangueira de PVC com diâmetro de 3/8" (0,952 cm), onde o líquido circula, e externamente à mangueira, uma isolamento térmica composta por espuma elastomérica. Desta forma obteve-se um ambiente com temperatura controlada e o calor distribuído uniformemente para os sensores.

O interrogador ótico, HBM® DI 410, faz a leitura dos sensores. Possui quatro canais com a capacidade de monitorar dezenas de sensores em uma única fibra e taxa de aquisição máxima de 1 kHz e 1 pm de resolução. O software CatmanEasy® - HBM® faz a leitura e aquisição dos dados dos sensores. A comunicação entre o computador e interrogador é realizada por protocolo TCP/IP. O calibrador de processos Fluke® 743B tem a função de medir a temperatura e servir como referência no processo de calibração.

Os sensores a fibra ótica utilizados neste trabalho foram caracterizados e calibrados utilizando o arranjo experimental, conforme ilustrado na Figura 24.



Figura 24. Fotografia da montagem usada para a caracterização.

A calibração é uma “operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação” (VIM,2008). Para que se tenha uma calibração adequada alguns itens devem ser observados:

- Uso de um padrão adequado, ou seja, um instrumento com classe de exatidão compatível; recomenda-se que a incerteza do padrão seja três vezes menor que a do sensor que se deseja calibrar. Recomenda-se que este padrão seja calibrado em laboratório acreditado pelo INMETRO com padrão rastreado pela RBC (Rede Brasileira de Calibração), desta forma, poderá se atribuir um valor considerado verdadeiro à variável medida. Por exemplo, em uma calibração utilizando banho térmico, a temperatura de referência, ou a temperatura “verdadeira”, será a indicada por este padrão calibrado. Recomenda-se que o

calibrador seja protegido para que não altere suas características de forma significativa após calibração.

- Controlar o ambiente, ou seja, evitar que eventos externos, ou outras variáveis influenciem no resultado do experimento. Como exemplo podemos citar a interferência entre equipamentos/circuitos eletroeletrônicos, fluxo de ar em calibrações de temperatura, variação da temperatura ambiente, entre outros.

- Estabilização dos instrumentos, é importante estar atento às orientações dos manuais dos equipamentos, normalmente possuem um tempo de “aquecimento”, geralmente por volta de trinta minutos após a energização.

- Redução das incertezas de calibração: para se reduzir as incertezas de calibração, além de atender os itens anteriores, devem ser adotados procedimentos adequados à calibração a ser realizada. O número de repetições da leitura de um ponto permitirá estimar com maior precisão o valor médio e permitirá obter o grau de variabilidade da leitura. Na prática, estes valores podem mostrar o quanto exato e preciso é a medição no valor em questão.

Conforme guia para a expressão de incerteza de medição, “quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física, é obrigatório que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou numa norma. É, portanto, necessário que haja um procedimento prontamente implementado, facilmente compreendido e de aceitação geral para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza” (INMETRO, 2008).

3.1.3.1 Determinação das incertezas de calibração

Após a aquisição dos dados é necessário avaliar os erros e incertezas envolvidos. O primeiro passo é analisar quais são as fontes de incertezas, por exemplo: incerteza devido à dispersão das amostras, resolução do equipamento, incertezas devido ao padrão utilizado

(laudo de calibração), regressão linear, entre outros. Desta forma, algumas informações deverão ser obtidas nos manuais dos equipamentos utilizados ou laudos de calibração no caso de instrumentos calibrados por órgãos externos.

Em calibrações a população estatística é um conjunto infinito de leituras, como é impossível realizar infinitas medições, escolhe-se uma amostra e com o uso da estatística inferencial deduz-se que se a amostra se comporta de uma forma, toda a população possui um comportamento próximo (VIM, 2008).

A média aritmética é definida como a soma de todos os valores, dividido pelo número de valores que compõe o grupo. A média de uma amostra é dada pela Equação (11) (INMETRO, 2008).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (11)$$

sendo x cada um dos valores e n o número de amostras.

O desvio padrão é a raiz quadrada da variância e mostra quanto os valores da amostra desviam da média, conforme Equação (12).

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

sendo x_i cada um dos valores, \bar{x} a média dos valores de x e n o número de amostras.

Incerteza padrão combinada é a incerteza de medição, estimada para a probabilidade de abrangência de 68,27%. A Incerteza expandida é a incerteza padrão multiplicada por um fator, normalmente dois ou três, que corresponde a uma abrangência de 95 e 99,7%, respectivamente (INMETRO, 2008).

Neste trabalho foram consideradas dois tipos de incertezas a do tipo A cuja avaliação usa métodos estatísticos e a incerteza do tipo B que não utiliza método estatístico, normalmente observação (VIM, 2008). O método usado para determinação das incertezas consiste na coleta de dados que relaciona as grandezas, em seguida realizam-se os cálculos das médias e desvios padrões. Com os dados calculados, informações disponíveis em manuais, laudos de calibração e catálogos do fabricante de instrumentos é possível determinar as incertezas do tipo A e do tipo B. Após o cálculo das incertezas individuais faz-

se o cálculo da incerteza padrão, em seguida expande-se a incerteza de forma a aumentar a abrangência para 95% ou superior e finalmente combinam-se as incertezas.

Após o cálculo do desvio padrão dos dados, utilizando a Equação (12), é possível obter a incerteza do tipo A, devido à dispersão das amostras, conforme equação (13).

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

sendo $s(x_k)$ o desvio padrão e n o número de amostras.

Para determinar a incerteza entre dois parâmetros, neste caso, a incerteza devido à regressão linear, obtida pelo método dos mínimos quadrados, considerando que os pontos são distribuídos normalmente ao redor da reta e de forma aleatória (CABRAL, 2008).

A equação de reta da regressão linear é dada por:

$$y = a \cdot x + b \quad (14)$$

onde a representa a inclinação da reta e b a ordenada na origem.

Caso sejam desconsideradas as incertezas das variáveis, o aspecto gráfico será conforme Figura 25 (a). Se considerada as incertezas associadas ao declive, será o da Figura 25 (b). Se considerada apenas a incerteza da ordenada na origem, será o da Figura 25 (c), se associadas ambas as incertezas, tem-se o aspecto da Figura 25 (d).

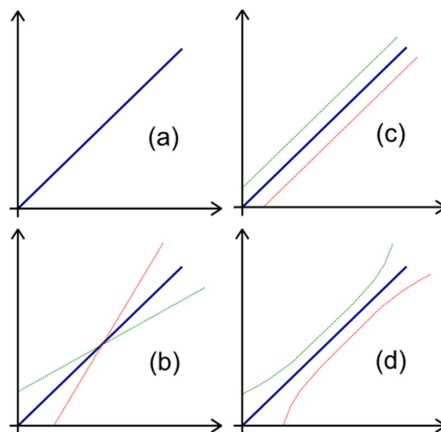


Figura 25. Gráficos das incertezas devido à regressão linear.

Em dados experimentais normalmente os dados obtidos não se ajustam perfeitamente à reta; quando distribuídos próximos à reta de regressão é possível determinar o desvio

padrão destes pontos em relação à reta de regressão linear pela Equação (15) (CABRAL, 2008).

$$s_{y|x} = \sqrt{\frac{n-1}{n-2}(s_y^2 - b^2 s_x^2)} \quad (15)$$

sendo s_y o desvio padrão dos valores de y , b o coeficiente angular, s_x o desvio padrão dos valores de x e n o número de pontos obtidos experimentalmente.

A incerteza do declive é dada por:

$$s_b = \frac{s_{y|x}}{s_x \sqrt{n-1}} \quad (16)$$

sendo $s_{y|x}$ o desvio padrão dos valores, s_x o desvio padrão dos valores de x e n o número de pontos obtidos experimentalmente.

A incerteza da ordenada na origem é dada por:

$$s_a = \pm \frac{s_{y|x}}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

A incerteza do valor interpolado é dado por (CABRAL, 2008):

$$u = \pm s_{y|x} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2}} \quad (18)$$

A forma usada para a determinação das incertezas do tipo B foi baseada nos instrumentos utilizados, como laudo de calibração e especificações do fabricante. No caso do interrogador ótico é dada a resolução. Este tipo de incerteza se deve ao fato do valor lido ter a mesma probabilidade de estar no intervalo, utiliza-se uma distribuição retangular, conforme Equação (19) (INMETRO, 2008).

$$u(\bar{x}) = \frac{\delta x}{\sqrt{12}} \quad (19)$$

Neste trabalho foram consideradas as incertezas do interrogador ótico, calibrador de processos e dos sensores de temperatura.

No caso de instrumentos com laudo de calibração deve-se considerar a incerteza expandida dada no laudo de calibração dividida pelo fator de abrangência, assim obtêm-se a

incerteza padrão. O valor usado do fator de abrangência usado neste trabalho é proveniente da tabela de distribuição *t-student*, devido ao número reduzido de amostras. Para número de amostras igual ou superior a trinta, usa-se a distribuição normal (CABRAL, 2008).

3.1.3.2 Resultados

Para a obtenção dos resultados de calibração dos sensores de temperatura foi utilizado o sistema de teste conforme ilustrado na Figura 24. Os resultados da Figura 26, Figura 27 e Figura 28, foram obtidos a partir da exposição dos sensores à temperatura de 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C e 60°C. Foram realizadas quatro repetições, os valores apresentados consistem na média das quatro repetições.

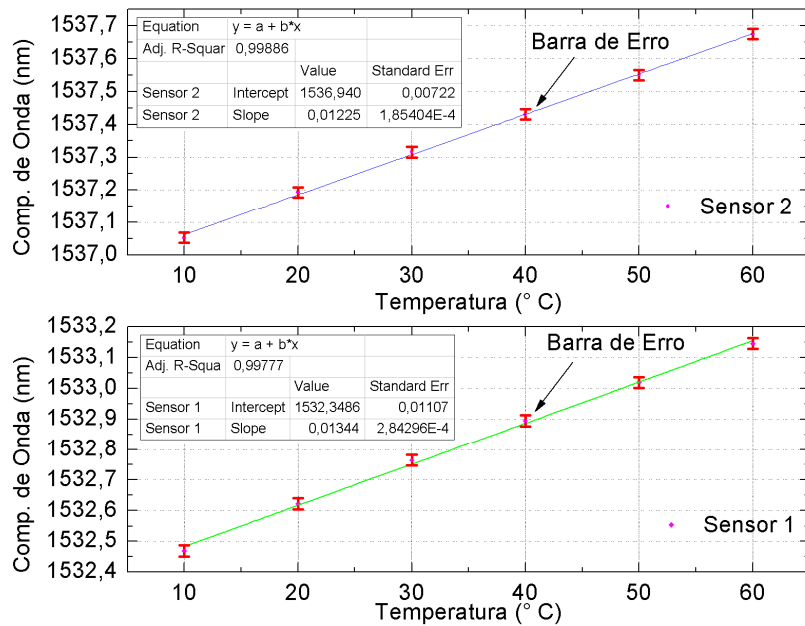


Figura 26. Gráfico da caracterização dos sensores 1 e 2.

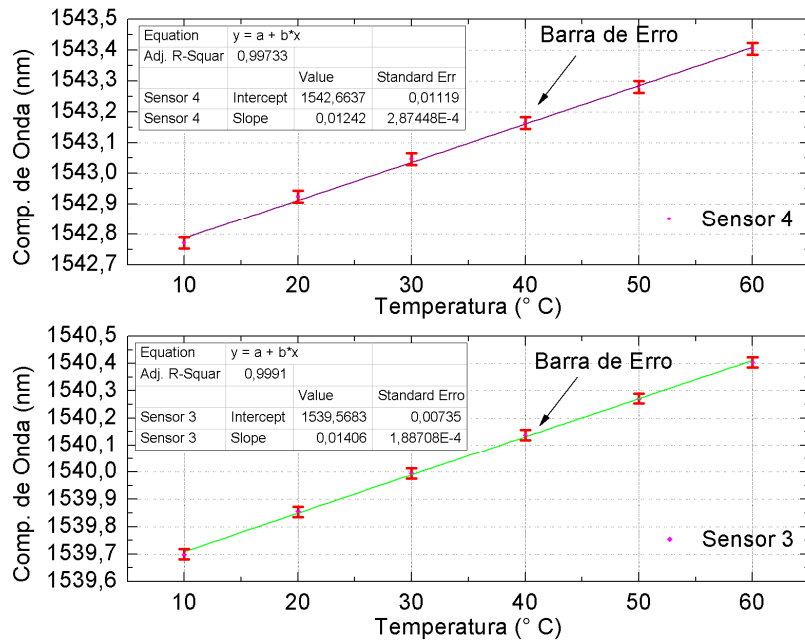


Figura 27. Gráfico da caracterização dos sensores 3 e 4.

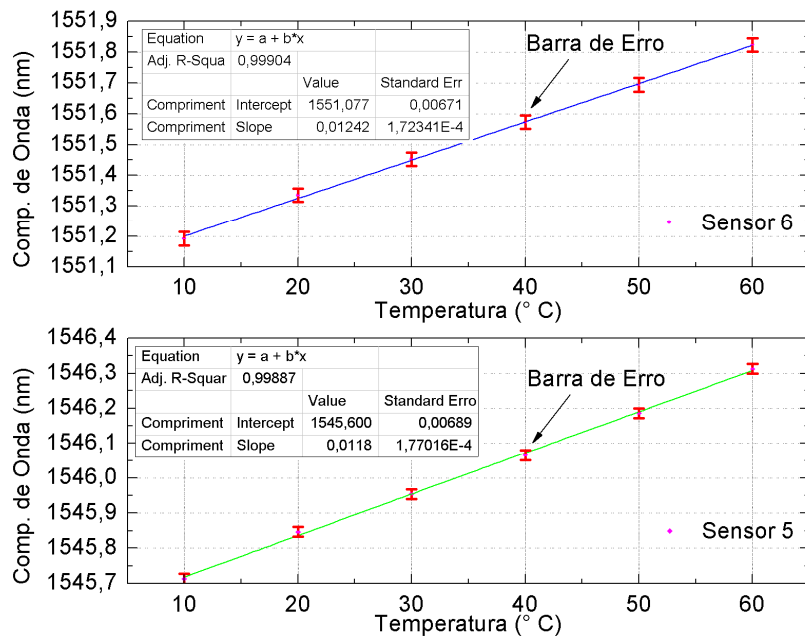


Figura 28. Gráfico da caracterização dos sensores 5 e 6.

Observa-se que os dados obtidos na caracterização apresentam um comportamento linear, permitindo que se utilize a relação linear entre o comprimento de onda e temperatura.

Realiza-se a regressão linear dos dados, pelo método dos mínimos quadrados, para se obter as equações de reta para cada conjunto de sensores, conforme resultados da Tabela 2.

Tabela 2. Tabela das Equações de reta dos sensores.

Sensor 1	$\lambda = 1532,348 + 0,01344 \cdot T$
Sensor 2	$\lambda = 1536,940 + 0,01225 \cdot T$
Sensor 3	$\lambda = 1539,568 + 0,01406 \cdot T$
Sensor 4	$\lambda = 1542,664 + 0,01242 \cdot T$
Sensor 5	$\lambda = 1545,600 + 0,01180 \cdot T$
Sensor 6	$\lambda = 1551,077 + 0,01240 \cdot T$

onde λ é o comprimento de onda (em nm) e T a temperatura (em °C).

A primeira etapa do cálculo de incertezas é determinar quais são as fontes de incertezas, neste caso, considera-se as seguintes incertezas:

- Dispersão das amostras – Incerteza do tipo A;
- Calibrador ou referência de temperatura – Incerteza do tipo B;
- Resolução do Calibrador – Incerteza do tipo B;
- Resolução do interrogador ótico – Incerteza do tipo B;
- Reta de regressão linear – Incerteza do tipo A.

Aplicam-se as equações (11) e (12) aos resultados experimentais obtidos na caracterização, obtêm-se as médias e desvios padrões de cada temperatura medida em quatro repetições, conforme Tabela 3, onde x representa a média aritmética (em nm) e s o desvio padrão (em pm).

Tabela 3. Média e Desvio padrão da calibração.

		Temperatura (°C)					
		10	20	30	40	50	60
Sensor 1	x	1532,468	1532,622	1532,764	1532,894	1533,019	1533,145
	s	3,109	4,5	4,434	2,081	1,258	1,414
Sensor 2	x	1537,053	1537,193	1537,316	1537,431	1537,549	1537,674
	s	3,593	1,500	3,862	1,632	0,816	0,957
Sensor 3	x	1539,699	1539,854	1539,994	1540,138	1540,271	1540,404
	s	5,123	5,066	5,066	4,760	0,577	0,500
Sensor 4	x	1542,771	1542,924	1543,046	1543,163	1543,281	1543,403
	s	5,259	3,000	3,862	3,366	0,816	0,957
Sensor 5	x	1545,713	1545,846	1545,954	1546,065	1546,186	1546,313
	s	0,577	0,957	2,217	2,886	3,403	2,630
Sensor 6	x	1551,193	1551,336	1551,452	1551,572	1551,694	1551,823
	s	4,082	2,943	6,855	2,061	4,546	4,203

Para o cálculo da incerteza escolhe-se uma faixa a se calcular, neste caso, optou-se por toda a região de temperatura medida, faixa de temperatura de 10 °C a 60 °C, desta forma escolhe-se o maior desvio padrão e obtêm-se a incerteza tipo A, devido à dispersão das amostras, a incerteza é dada pela equação (20).

$$u(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

O fator de abrangência usado neste trabalho é proveniente da Tabela 4, distribuição *t-student*, para quatro amostras ($4 - 1 = 3$) e com probabilidade de abrangência de 95,45%, tem-se $k = 3,31$; valor que representa na distribuição normal o dobro do desvio padrão das amostras, usualmente adotado para expressão de incertezas em laudos de calibração. Para o calculo da incerteza expandida utiliza-se a equação (21):

$$u_0(\bar{x})_{exp} = k \cdot u_0(\bar{x}) \quad (21)$$

onde k é fator de abrangência, $u(\bar{x})$ a incerteza do tipo A devido a dispersão das amostras e $u_{exp}(\bar{x})$ a incerteza expandida.

Tabela 4. Tabela *t-student*.

Nº amostras - 1	k para 68,27 [%]	k para 95,45 [%]	k para 99,73 [%]
1	1,84	13,97	235,80
2	1,32	4,53	19,21
3	1,20	3,31	9,22
4	1,14	2,87	6,62
5	1,11	2,65	5,51
10	1,05	2,28	3,96
15	1,03	2,18	3,59
20	1,03	2,13	3,42
25	1,02	2,11	3,33
30	1,02	2,09	3,27
100	1,005	1,984	3,077

A partir da equação (20), com $n = 4$, obtêm-se os valores dos sensores conforme Tabela 5.

Tabela 5. Incerteza tipo A devido a dispersão das amostras.

Sensor	$s(x)$ [nm]	$u(\bar{x})$ [nm]	$u_{\text{exp}}(\bar{x})$ [nm]
1	0,004434	0,002217	0,007338
2	0,003862	0,001931	0,006392
3	0,005123	0,002562	0,008479
4	0,005259	0,002630	0,008704
5	0,003403	0,001702	0,005632
6	0,006855	0,003428	0,011345

Para a incerteza devido ao calibrador de temperatura utiliza-se o próprio laudo de calibração do equipamento, neste caso, informado o valor de incerteza padrão expandida de 0,30 °C, $k = 2$, e grau de abrangência de 95,45%.

A incerteza devida à resolução pode ser expressa por uma distribuição de probabilidade retangular, ou seja, em um intervalo entre “ a_+ ” e “ a_- ”, a probabilidade é de 50% para cada um destes valores. Neste caso, a função densidade de probabilidade é dada pela equação (22).

$$f(x) = \frac{1}{a_+ - a_-} \quad (22)$$

O valor médio é dado pela equação (23).

$$x = \frac{a_- + a_+}{2} \quad (23)$$

E variância é dada pela equação (24).

$$\text{var}(x) = \sigma^2 = \frac{(a_- + a_+)^2}{12} \quad (24)$$

O que resulta um desvio padrão dado pela equação (25).

$$u(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{12}} \quad (25)$$

Para determinação da incerteza devido à resolução do calibrador, utiliza-se a equação (25). Conforme informado pela manual do fabricante, o instrumento apresenta resolução de 0,01 °C.

$$u_2(\bar{x}) = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 0,00289 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (26)$$

Conforme informado pela manual do fabricante, a resolução do interrogador ótico é de 0,001 [nm]. Aplica-se a equação (25) para determinação da incerteza.

$$u_3(\bar{x}) = \frac{0,001}{\sqrt{12}} = 0,000289 \text{ [nm]} \quad (27)$$

Para determinar a incerteza devida à regressão linear considera-se que os pontos são distribuídos normalmente ao redor da reta e de forma aleatória (CABRAL, 2008).

Em dados experimentais, normalmente, os dados obtidos não se ajustam perfeitamente à reta; quando distribuídos próximos à reta de regressão é possível determinar o desvio padrão destes pontos em relação à reta de regressão linear pela Equação (28) (CABRAL, 2008).

$$s_{y|x} = \sqrt{\frac{n-1}{n-2} (s_y^2 - b^2 s_x^2)} \quad (28)$$

onde b é a inclinação da reta, \bar{x} a média dos valores de x , \bar{y} a média dos valores de y , s_x o desvio padrão dos valores de x , s_y o desvio padrão dos valores de y e n o número de medições realizadas. Utilizam-se os valores da Tabela 6 nas equações (15), (16), (17), obtêm-se os valores da Tabela 7.

Tabela 6. Regressão linear, médias e desvios padrões.

Sensor	b	\bar{x}	\bar{y}	s_x	s_y	n
1	0,0134	35	1532,819	18,708	0,252	6
2	0,0122	35	1537,369	18,708	0,229	6
3	0,0141	35	1540,060	18,708	0,263	6
4	0,0124	35	1543,098	18,708	0,233	6
5	0,0118	35	1546,013	18,708	0,221	6
6	0,0124	35	1551,512	18,708	0,232	6

Tabela 7. Incertezas devida à regressão linear.

Sensor	$s_{y x}$ [nm]	u [nm]	u (°C)	u_{exp} (°C)
1	0,00082491	0,000337	0,02513	0,050
2	0,00043575	0,000178	0,01458	0,029
3	0,00051546	0,00021	0,01492	0,030
4	0,00059331	0,000242	0,01953	0,039
5	0,00013562	0,0000554	0,00469	0,009
6	0,00012064	0,0000492	0,00040	0,001

Como a caracterização foi realizada apenas para as temperaturas entre 10°C e 60°C, o cálculo da incerteza padrão combinada é válido apenas para esta faixa de temperatura.

Para o cálculo das incertezas do tipo A (devido à dispersão das amostras) foram utilizadas as equações (13) e (14). Para o cálculo das incertezas do tipo B (devida à resolução do instrumento) utiliza-se a Equação (25). Desta forma, obtêm-se os resultados, conforme Tabela 8.

Tabela 8. Incertezas calculadas

Fonte	Tipo	$u_n(\bar{x})$	k	$u_{exp}(\bar{x})$	Unidade	b [nm/°C]	$u_{exp}(\bar{x})$ °C
S1 – Dispersão das amostras	A	0,002217	3,31	0,007338	nm	0,0134	0,548
S2 – Dispersão das amostras	A	0,001931	3,31	0,006392	nm	0,0122	0,524
S3 – Dispersão das amostras	A	0,002562	3,31	0,008479	nm	0,0141	0,601
S4 – Dispersão das amostras	A	0,002630	3,31	0,008704	nm	0,0124	0,702
S5 – Dispersão das amostras	A	0,001702	3,31	0,005632	nm	0,0118	0,477
S6 – Dispersão das amostras	A	0,003428	3,31	0,011345	nm	0,0124	0,915
S1 – Regressão linear	A	0,02513	2	0,050	nm	0,0134	3,731343
S2 – Regressão linear	A	0,01458	2	0,029	nm	0,0122	2,377049
S3 – Regressão linear	A	0,01492	2	0,030	nm	0,0141	2,12766
S4 – Regressão linear	A	0,01953	2	0,039	nm	0,0124	3,145161
S5 – Regressão linear	A	0,00469	2	0,009	nm	0,0118	0,762712
S6 – Regressão linear	A	0,00040	2	0,001	nm	0,0124	0,080645
(S1 a S6) – Calibrador ou referência de temperatura	B	0,15	2	0,30	°C	1	0,300
(S1 a S6) - Resolução do Calibrador	B	0,00289	2	0,00578	°C	1	0,006
S1 - Resolução do interrogador ótico	B	0,000289	2	0,000578	nm	0,0134	0,043
S2 - Resolução do interrogador ótico	B	0,000289	2	0,000578	nm	0,0122	0,0474
S3 - Resolução do interrogador ótico	B	0,000289	2	0,000578	nm	0,0141	0,0410
S4 - Resolução do interrogador ótico	B	0,000289	2	0,000578	nm	0,0124	0,0467
S5 - Resolução do interrogador ótico	B	0,000289	2	0,000578	nm	0,0118	0,0490
S6 - Resolução do interrogador ótico	B	0,000289	2	0,000578	nm	0,0124	0,047

Observa-se na Tabela 8 que a incerteza devida à resolução do interrogador ótico é a mesma para todos os sensores, mas a incerteza dada em nm deve ser convertida para °C, desta forma, passa a depender da sensibilidade de cada sensor, apresentando uma pequena diferença entre os sensores. Analisando-se as informações da Tabela 8 é possível concluir que as maiores contribuições de incerteza ocorrem devido à dispersão das amostras, regressão linear dos dados.

Para obter a incerteza padrão combinada, para incertezas correlacionadas utiliza-se a equação (29).

$$u_{c_exp}^2(\bar{x}) = u_0^2(\bar{x}) + u_1^2(\bar{x}) + u_2^2(\bar{x}) + u_3^2(\bar{x}) + u_4^2(\bar{x}) \quad (29)$$

Aplicando-se a equação (29) nas incertezas de todos os sensores é possível obter a incerteza expandida combinada, conforme Tabela 9.

Tabela 9. Incertezas combinadas.

Sensor	$u_{\text{Comb_exp}}(\bar{x})$ [°C]
1	3,78
2	2,45
3	2,23
4	3,23
5	0,95
6	0,97

As incertezas obtidas apresentam valores elevados devido à dispersão dos dados obtidos, ao pequeno número de repetições e desvios na adequação dos dados à reta. As incertezas após combinadas apresentam valores entre 0,97°C e 3,78°C, conforme Tabela 9, indicando uma diferença entre as medições dos sensores, causada pelo processo de fabricação e calibração.

3.2 INSTALAÇÃO DOS SENSORES NA UHEDRJ

Após o desenvolvimento, caracterização e calibração dos sensores fez-se a instalação dos sensores na ponte retificadora trifásica controlada da UHEDRJ. Para a fixação dos sensores, utilizou-se cola - 3M® – 598 Black High performance RTV da empresa LOCTITE®. O

local escolhido foi o dissipador de calor (na direção do tiristor, parte posterior), conforme ilustrado na Figura 29.

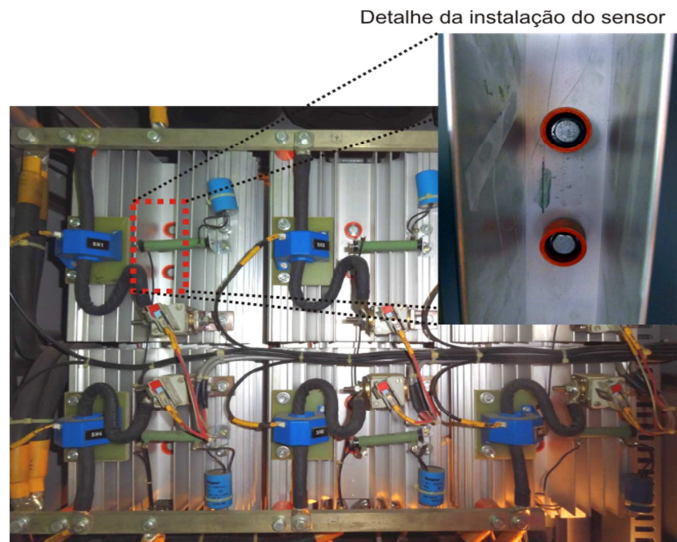


Figura 29. Fotografia do sensor FBG instalado nos dissipadores de calor dos tiristores na UHEDRJ.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das medições realizadas na UHEDRJ, usando-se os sensores de temperatura mencionados no capítulo 3.

Os ensaios foram realizados em duas situações: unidade geradora excitada a vazio e com carga. Para que as medições fossem realizadas foi necessário a partida da unidade até a rotação nominal e comandada a excitação da unidade.

Há duas formas de partida da unidade, uma em modo manual e outra em modo automático. É um procedimento comum em retorno de unidade após manutenção a partida em modo manual de forma a se monitorar a unidade geradora e os equipamentos auxiliares. A partida manual é mais lenta, pois cada etapa do processo de partida deve ser comandada pelo operador, após a condição satisfeita. Na partida em modo automático, o comando da próxima etapa inicia no mesmo instante da atuação da pré-condição. No comando em automático é possível escolher a partida a vazio (marcha a vazio), a vazio excitada, ou acoplada (marcha acoplado). Na partida a vazio, há o comando de partida da turbina sem a excitação do gerador. A unidade, após a partida, apresenta rotação nominal, mas sem excitação, ou seja, sem tensão no gerador. Na partida em marcha a vazio excitada, ocorre a partida da unidade até a rotação nominal e em seguida ocorre o fechamento do disjuntor de campo, excitando a unidade. Nesta situação o gerador apresenta tensão elétrica em seus terminais. A única carga neste momento é excitação do gerador. Na partida em marcha acoplada é realizado todo o processo de partida, excitação incluindo o sincronismo com a rede. Permite-se desta forma, que a unidade geradora forneça energia para o sistema.

Nos eventos da Tabela 12 (Anexos) é possível determinar o momento da excitação da unidade durante o fechamento do disjuntor de campo (41D) e o sincronismo ocorre no fechamento do disjuntor de grupo (52G). A partida ou parada ocorre no momento de transição do evento grupo parado (44GP). Conforme processo de partida e parada da unidade geradora, mostrado anteriormente, é possível conhecer os estados operativos da unidade e definir regiões de operação, conforme Tabela 10.

Para a análise térmica são importantes os momentos de excitação, sincronismo, rampa de carga e desexcitação; pois ocorre variação na corrente de campo, a mesma conduzida pelos tiristores.

Tabela 10. Regiões de operação da unidade geradora – 1º ensaio.

t (s)	Tempo (h:min:s)	Estado
50	15:36:57	Excitação
1080	15:54:24	Desexcitação
1185	15:56:01	Excitação
1350	15:58:53	Desexcitação
1375	15:59:14	Excitação
2074	16:10:54	Desexcitação
2930	16:25:08	Excitação
3500	16:34:25	Desexcitação
4395	16:49:21	Excitação
4417	16:49:59	Desexcitação
4421	16:52:29	Excitação
4570	16:53:11	Sincronismo
4850	16:57:50	Rampa de Carga
5284	17:04:09	Abre sincronismo e desexcitação
5615	17:09:55	Excitação
5652	17:10:34	Sincronismo
5700	17:11:22	Rampa de Carga

Na Figura 30 são apresentadas as curvas de resposta dos sensores de temperatura medidas pelos sensores óticos. No início, todos os sensores estão em equilíbrio com a temperatura ambiente, em torno de 24°C, em seguida há um aumento de temperatura nos sensores, na região excitada, entre os tempos 50 e 1080 segundos. Ainda é possível observar curvas com crescimento exponencial, próximo do momento da excitação, e em seguida quase linear. No momento da desexcitação ocorre o inverso, há uma queda de temperatura exponencial e, após alguns segundos com comportamento quase linear, ocorre uma nova excitação em $t = 1185$ s. Durante a segunda excitação, observa-se um comportamento similar ao primeiro aquecimento, com duração menor. Em 1350 segundos ocorre uma nova desexcitação e um comportamento de resfriamento similar ao primeiro resfriamento. Ocorrem mais quatro excitações e três desexcitações com os mesmos comportamentos. Após o sincronismo em 4570 segundos há uma região com várias inclinações, ou seja, variações de temperatura com taxas (dT/dt) distintas em cada período. Nesta etapa ocorrem variações na corrente de campo de forma a controlar a tensão do gerador, causando a diferença de inclinações. Um comportamento similar ocorre após o segundo sincronismo em 5632 segundos. Em torno de 5800 segundos ocorre o término da aquisição dos dados.

Ainda na Figura 30, observa-se que os seis sensores apresentam variações na mesma tendência, mas com amplitudes diferentes. Estima-se que devido à disposição no painel os tiristores dois, três e seis, por estarem localizados na parte superior, apresentam maiores temperaturas. O tiristor dois, localizado na lateral esquerda, apresenta o maior aquecimento. Desta forma, a temperatura é maior nos tiristores localizados da esquerda para a direita e de baixo para cima. A menor temperatura é apresentada pelo tiristor cinco, localizado no canto inferior esquerdo. Outra fonte de calor importante no painel é o disjuntor de campo. Ele está localizado na lateral direita do painel, o que ajuda a explicar o motivo dos tiristores localizados do lado direito apresentarem temperaturas mais elevadas.

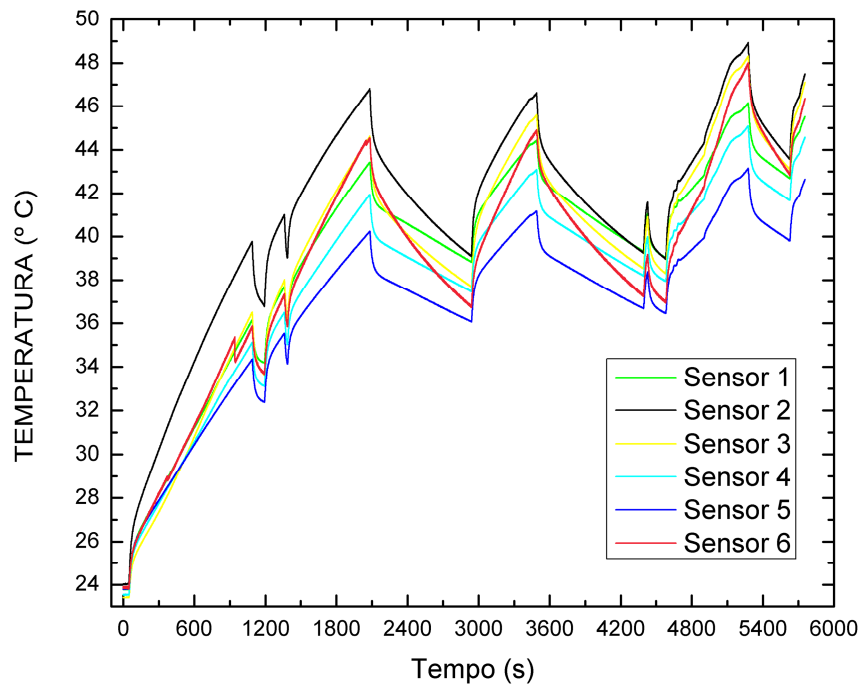


Figura 30. Gráfico da temperatura em função do tempo.

A corrente de excitação é a mesma corrente que circula pelos tiristores da ponte. Por este motivo, é a variável que mais influencia no aquecimento e será estudada com maiores detalhes.

Na Figura 31 são apresentadas as curvas de temperatura e corrente de campo *versus* tempo durante todo o ensaio. Observa-se uma correlação entre a corrente e temperatura, ou seja, quanto maior o valor da corrente de campo, maior a variação de temperatura. Nota-se que até o momento 4250 segundos ocorrem cinco excitações com corrente de excitação de mesma amplitude. Em todas as excitações a vazio, a temperatura apresentou inclinação similar. Após o sincronismo da unidade geradora com a rede, no tempo 4250 segundos, ocorre uma redução na corrente de campo e posteriormente um aumento causando uma redução no aumento de temperatura e em seguida uma inclinação de maior intensidade até o momento 5284 segundos, quando ocorre o desligamento da unidade.

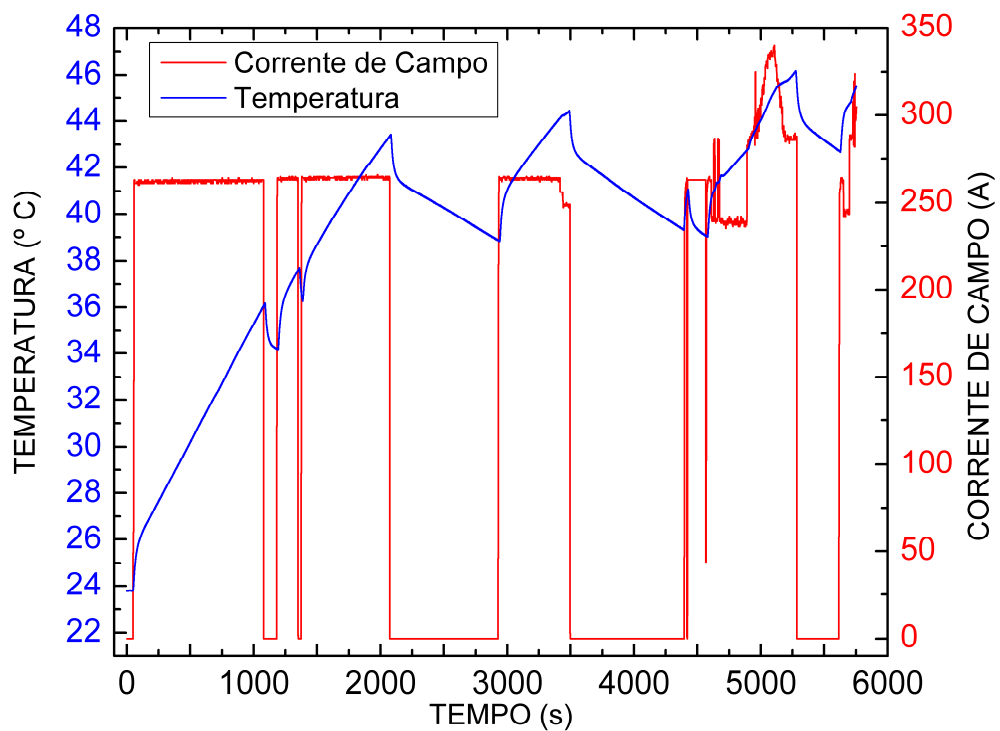


Figura 31. Relação entre Temperatura e Corrente de Campo (0 - 6000s).

Na Figura 32 são apresentadas as curvas de temperatura e corrente de campo durante a primeira excitação, é possível observar um comportamento exponencial no momento do fechamento do disjuntor de campo e excitação da unidade, este crescimento ocorre por um tempo aproximado de 50s, em seguida o crescimento apresenta um comportamento quase linear, explicado por uma exponencial com tempo elevado. Para explicar este comportamento, deve-se considerar a Equação (9), onde a exponencial com a menor duração, ou menor tempo, determina o início da curva e a componente com maior duração o final da curva. Desta forma, o aumento de temperatura de forma exponencial no início da excitação ocorre devido às constantes de tempo de menor duração e em seguida a variação de temperatura ocorre de forma quase linear. Isto mostra que a maior constante de tempo não foi atingida, ou seja, não se chegou a uma região de equilíbrio térmico.

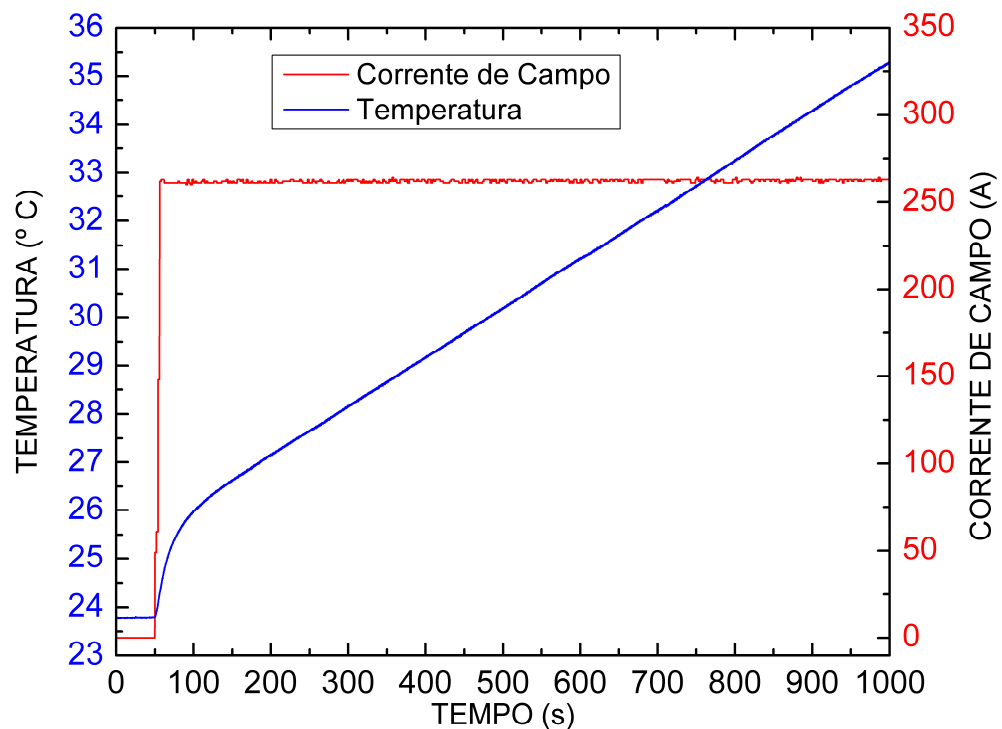


Figura 32. Curva de aquecimento (0 - 1000s).

A ventilação do painel e dissipadores de calor aumentam a troca térmica para o resfriamento do tiristor. Observa-se na Figura 33 um decaimento exponencial no momento da abertura do disjuntor de campo (desexcitação), por um tempo aproximado de 50s, e em seguida com taxa quase linear.

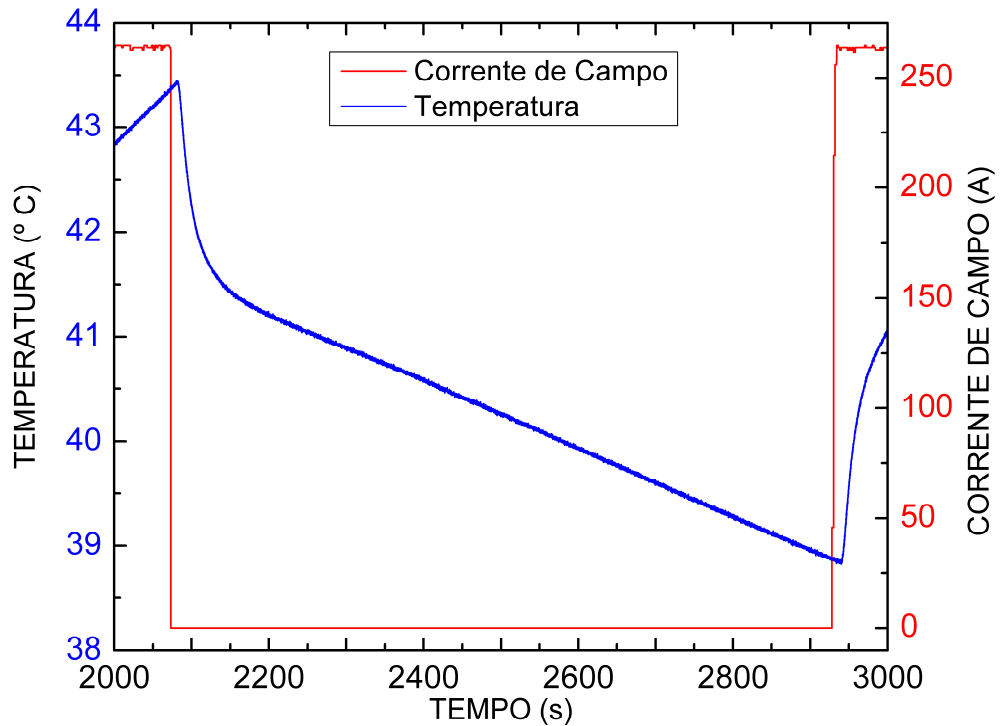


Figura 33. Curva de resfriamento (2000 – 3000s).

Os resultados da Figura 34 mostram variações de temperatura com diversas inclinações proporcionais à corrente de campo, observa-se que há um aumento na corrente de excitação no momento da rampa de carga e pequenas oscilações devido à regulação de tensão do gerador. No instante 4610s ocorre o sincronismo da unidade com a rede, neste momento o regulador de tensão controla a corrente de campo de forma a manter a tensão do gerador constante. As variações na corrente de campo causam variações na temperatura dos tiristores com inclinações proporcionais à corrente de campo. O regulador de velocidade deve manter a velocidade constante, desta forma o fluxo de água na turbina é controlado para que haja um equilíbrio entre a potência elétrica e a potência mecânica, paralelamente,

o regulador de tensão deve aumentar a corrente de excitação para que se mantenha a mesma tensão terminal no gerador.

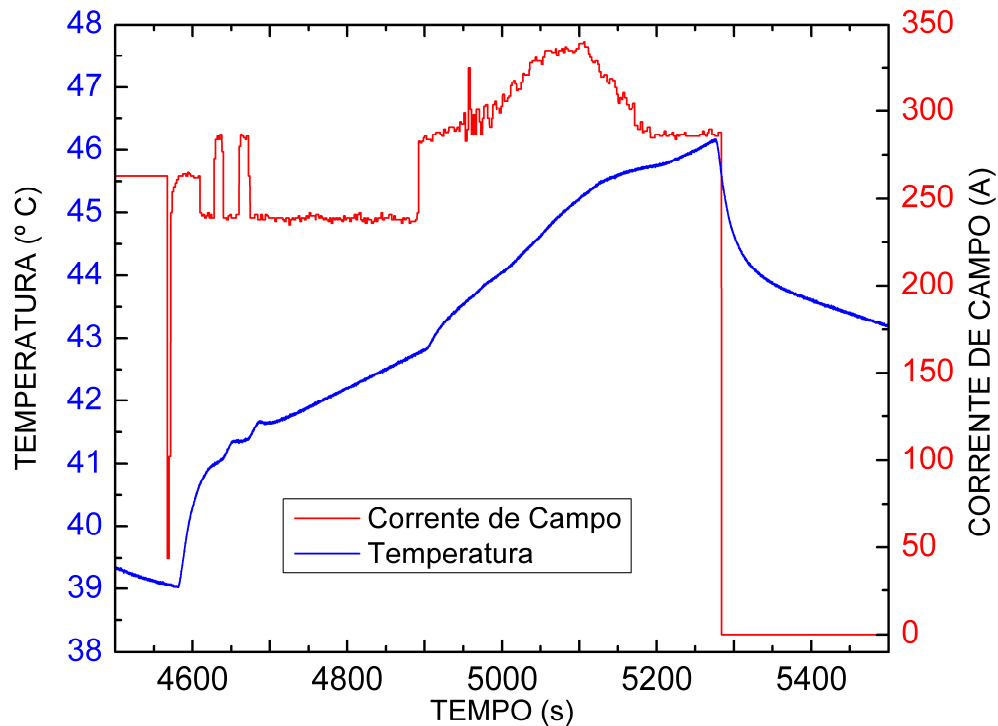


Figura 34. Aquecimento na região rampa de carga (4500 - 5500 s).

Os resultados da Figura 35 mostram as duas regiões da unidade sincronizada ao sistema, no primeiro sincronismo a unidade foi submetida a uma rampa de carga de aproximadamente 26,4 kW/s, iniciando na potência zero no momento 4850 segundos (Início da rampa de carga) a 5070 segundos com 5,8 MW. Para que haja um aumento na potência fornecida pelo gerador ao sistema é necessário que se aumente a potência mecânica, neste caso, o servomotor deve abrir e permitir que um fluxo maior de água passe pela turbina. Devido às características construtivas da turbina e de todo o conjunto hidráulico há limitações de operação da turbina por longos períodos na faixa de potência entre 2,5 MW e 3,5 MW, chamada de região de turbulência. Observa-se uma região de turbulência entre os tempos de 4945 a 4983 segundos. No momento 5284 segundos a unidade geradora é desconectada do sistema e retirada a excitação do gerador, com a abertura do disjuntor de

grupo e de campo, respectivamente. Em 5613 segundos a unidade retorna ao sincronismo e inicia uma nova rampa de carga, com comportamento similar à rampa anterior. Observa-se que a temperatura aumenta com uma taxa mais baixa mesmo com potência ativa nula ($t = 5250$ s), pois neste caso, reduz-se a corrente de campo, mas como não alcançou o equilíbrio, a temperatura permanece aumentando. A temperatura só começa a cair na abertura do disjuntor ($t = 5300$ s). Os resultados da Figura 35 permitem indicar a condição da unidade geradora de forma indireta, pois a potência ativa influencia na excitatriz e na temperatura dos tiristores.

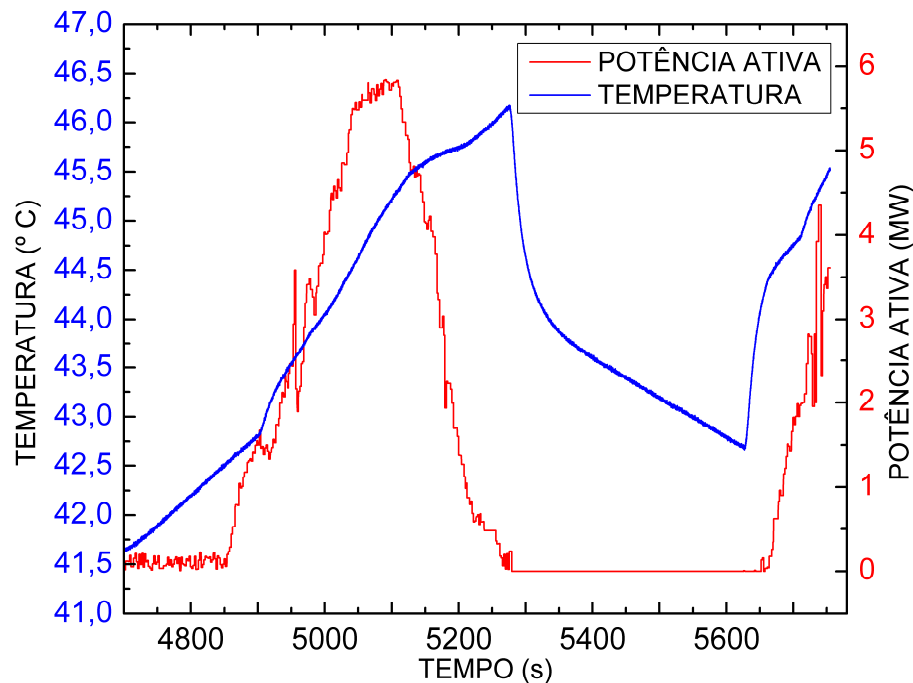


Figura 35. Relação Potência ativa e Temperatura (4700 - 5900s).

Os sensores permaneceram instalados na ponte retificadora da UHEDRJ desde a instalação para aquisição dos resultados em setembro de 2012. Após um ano foram realizadas novas aquisições, pois os resultados obtidos anteriormente foram aquisitados por um tempo curto não conseguindo prever o comportamento da unidade até a estabilidade da temperatura. Notou-se que após um ano as repostas dos sensores se mantiveram conforme a primeira aquisição realizada.

Nos eventos da Tabela 13 (Apêndice) é possível determinar o momento da excitação da unidade quando há o fechamento do disjuntor de campo (41D) e o sincronismo ocorre no fechamento do disjuntor de grupo (52G). A partida ou parada ocorre no momento de transição do evento grupo parado (44GP). Conforme processo de partida e parada da unidade geradora, mostrado anteriormente, é possível conhecer os estados operativos da unidade e definir regiões de operação, conforme Tabela 11.

Tabela 11. Regiões de operação da unidade geradora – 2º ensaio.

t (min)	Tempo (Dia/Mês/Ano - h:min:s)	Estado
7	05/09/2013 - 15:43:06	Excitação
8	05/09/2013 - 15:43:50	Desexcitação
20	05/09/2013 - 15:54:50	Excitação
20	05/09/2013 - 15:55:04	Sincronismo

Observa-se no gráfico da Figura 36 que os sensores apresentam variações com a mesma tendência e o mesmo comportamento observado no ano anterior, ou seja, os tiristores 2 e 3, localizados no canto superior direito do painel apresentam maiores temperaturas, quando comparados aos sensores 4 e 5 localizados no canto inferior esquerdo do painel.

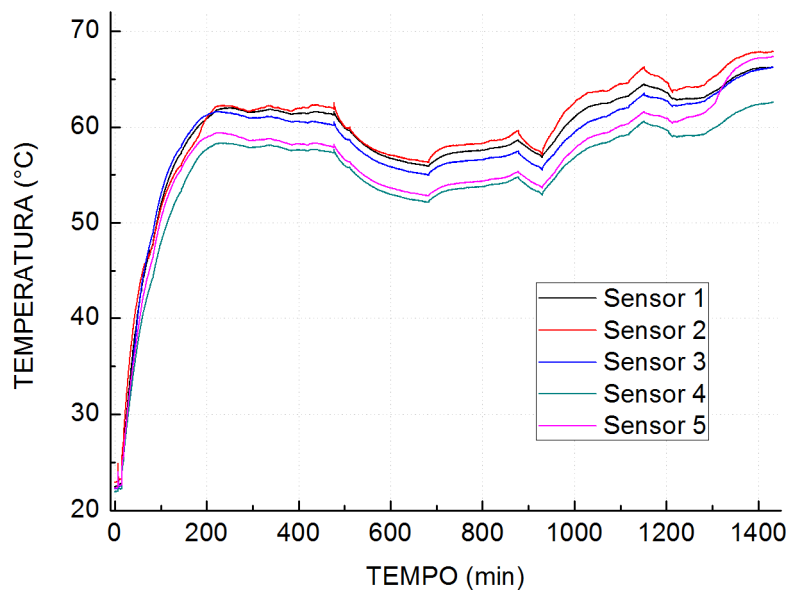


Figura 36. Gráfico da temperatura dos sensores – 2ª Etapa.

Para entender o comportamento da temperatura no interior do painel é importante conhecer como ocorre a transferência de calor. A energia térmica flui do corpo mais quente para o mais frio. O calor pode ser transferido de um corpo para outro de três formas: condução, convecção e radiação. Condução ocorre por um contato direto das partículas de matéria, neste caso a dissipação nos dissipadores de calor é a principal forma de transferência de energia. A convecção ocorre pelo movimento de moléculas de uma parte do material para outra. No caso em estudo, a ventilação forçada, acentua a transferência de calor por convecção. A terceira forma de transferência de calor é por radiação, nesta forma, todos os corpos acima do zero absoluto irradiam energia proporcional ao valor da temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, maior a energia irradiada (WIKI, 2012). Na Figura 37 é possível observar a disposição dos sensores no painel e como a temperatura é transferida. Neste caso em questão, o tiristor é a maior fonte de calor. A condução ocorre do centro do dissipador, onde o tiristor é fixado, para a periferia, da mesma forma que a radiação, com maior intensidade quanto mais próximo da fonte de calor. A convecção ocorre normalmente do dissipador para o ar, como existe a ventilação forçada, a convecção segue o fluxo de ar. As entradas de ar do painel são localizadas na parte inferior do painel e os ventiladores na parte superior, causando um fluxo de ar no sentido de baixo para cima.

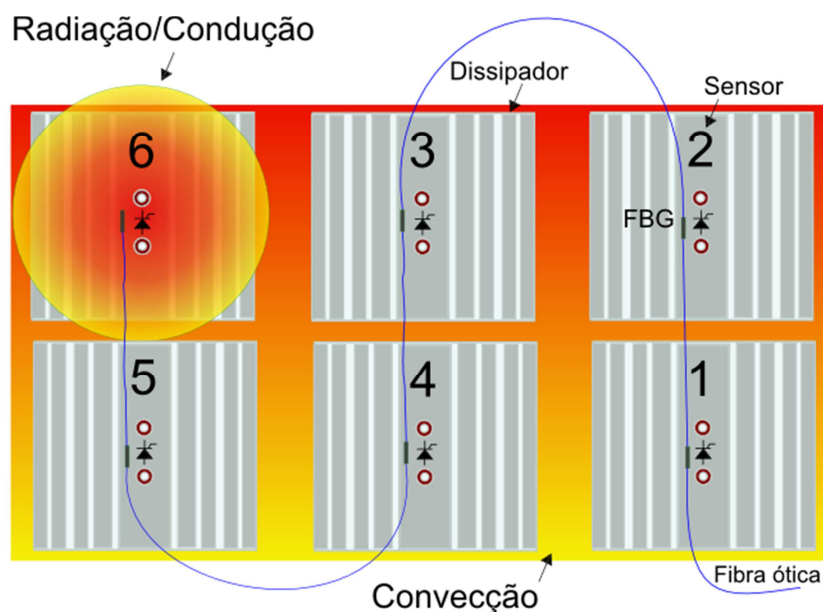


Figura 37. Ilustração da transferência de calor e disposição dos sensores FBGs.

Para confirmar os resultados obtidos pelos sensores de temperatura a fibra ótica foi realizada a imagem térmica do painel. A imagem térmica foi tirada em duas situações: unidade parada e em equilíbrio (04/09/2013) com temperatura ambiente de 19 °C, conforme Figura 38; Unidade sincronizada em equilíbrio térmico, operação com potência nominal por aproximadamente 90 horas (09/09/2013), conforme Figura 39.

É possível observar na Figura 38 que o painel apresenta temperatura uniforme e próxima dos 18 °C, o único componente que apresenta temperatura acima de 20 °C é o circuito de monitoramento de condução por possuir alimentação, mesmo sem condução dos tiristores.

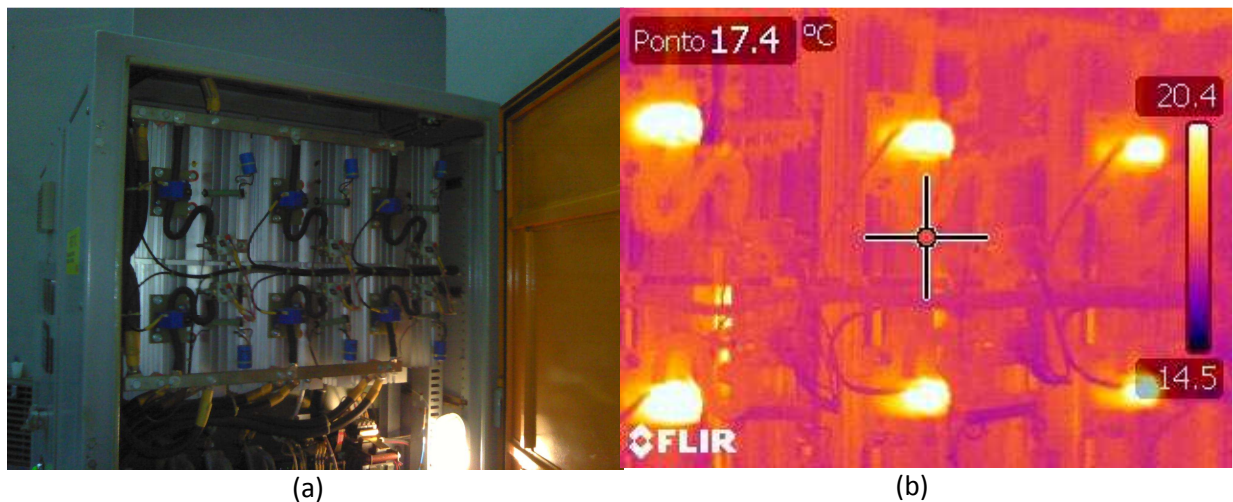


Figura 38. Ponte retificadora (a) Fotografia e (b) imagem térmica, unidade parada.

Na Figura 39 é possível observar as temperaturas no dissipador do tiristor 6, após estabilização da temperatura na ponte. Diferentemente da imagem térmica anterior, onde o medidor de condução apresentava a maior temperatura, os componentes com maiores aquecimentos são: resistor (73°C), Cabo de conexão com o barramento (67,7°C) e dissipador, próximo ao sensor de temperatura (61°C). Nota-se que o valor de 61°C registrado na imagem térmica é compatível com o valor médio após a estabilização, conforme Figura 36.

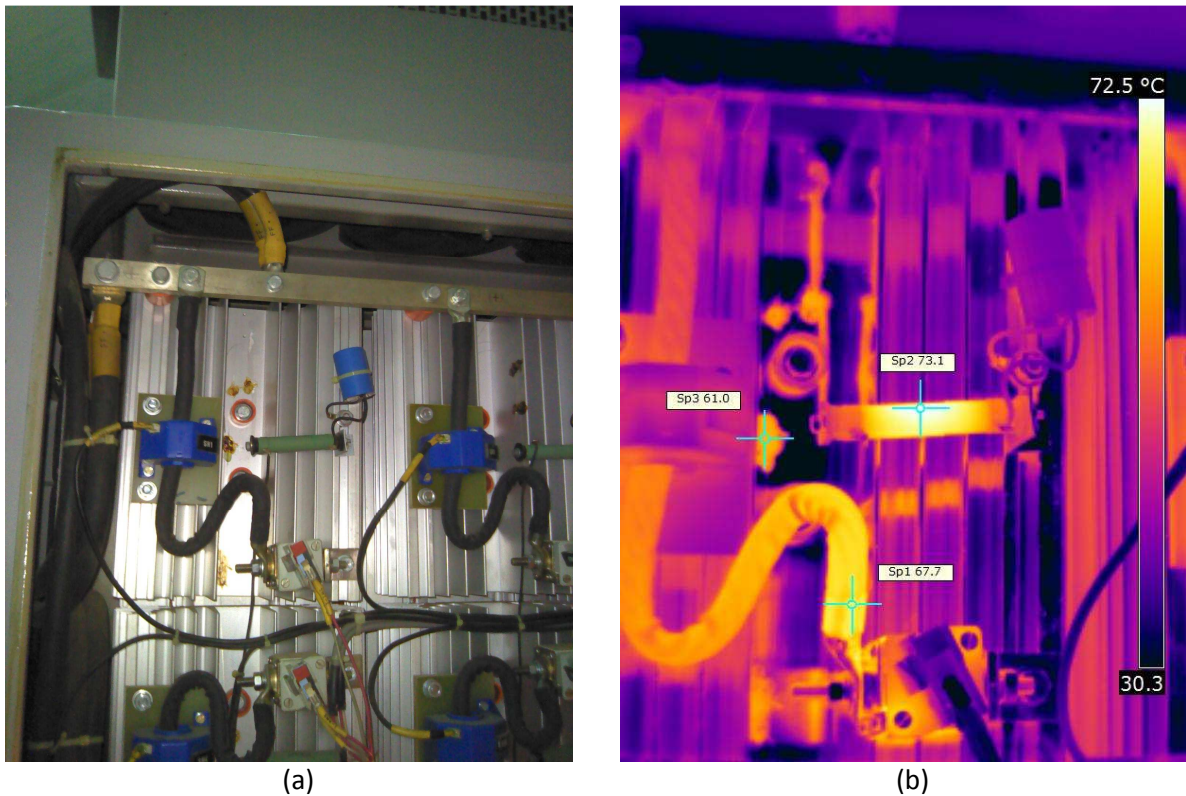


Figura 39. Ponte retificadora (a) Fotografia e (b) imagem térmica, após estabilização térmica.

No gráfico da Figura 40 nota-se uma correlação entre a temperatura e a corrente de campo, similar à observada no gráfico da Figura 31, obtida um ano antes (28/09/2012). Entre os tempos 60 e 80 minutos observa-se uma queda abrupta na corrente, embora tenha um aumento na temperatura, este ocorre mais lentamente, pois o sistema ainda não atingiu o equilíbrio. Por volta de 85 minutos observa-se um aumento na corrente de campo, causando um aumento de dT/dt até a estabilização da temperatura, aproximadamente no minuto 240, ou 3h 40 min após o sincronismo. Durante este período de 0 a 240 minutos nota-se que a corrente varia de 300A a 340A e a temperatura apresenta um crescimento exponencial, variando de 22°C a 62°C.

Após a estabilização observa-se que uma queda na corrente impacta na redução de temperatura, como pode ser observado após 480 minutos, onde a temperatura reduz de 62°C para 56°C no tempo 680 minutos.

No tempo 930 minutos ocorre um crescimento na temperatura devido a um aumento na corrente de campo, a corrente de campo aumenta de 296A para 368A e a temperatura

umenta de 57°C para 66°C no tempo 1150 minutos. Observa-se que no momento 1150 minutos ocorre o maior valor de corrente de campo, neste momento a temperatura é de 66°C. A maior temperatura observada ocorre em 1400 minutos, com o valor de 68°C.

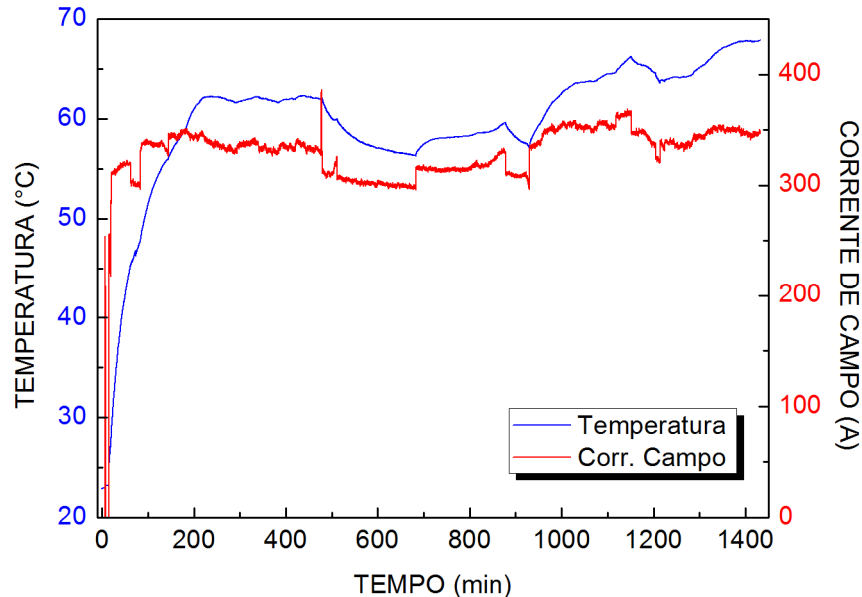


Figura 40. Gráfico da temperatura em relação à corrente de campo – 2ª etapa.

De uma forma geral a temperatura depende da corrente de campo, uma variação na corrente de campo causa uma variação diretamente proporcional a temperatura. A temperatura ambiente é um fator que também deve ser considerado, este fator ajuda a explicar o valor máximo de temperatura observado durante os ensaios. O maior valor de corrente ocorre aproximadamente 11h00min AM do dia 06/09/2013, o maior valor de temperatura ocorre às 03h30min PM, onde a temperatura ambiente apresenta um valor superior ao período da manhã, uma variação estimada de 4°C.

No gráfico da Figura 41, observa-se que o sincronismo ocorre em 15 minutos e durante todo o período (0 - 300 minutos) o crescimento da temperatura (dT/dt) é proporcional ao crescimento da corrente de campo. A temperatura se estabiliza em aproximadamente 235 minutos, ou seja, 3h40min após o sincronismo. Nota-se que a temperatura ambiente pode ser considerada como um fator que influencia na estabilização, estima-se que a temperatura ambiente seja aproximadamente 6°C menor às 08h00min PM, quando comparada ao

momento do sincronismo (04h00min PM). Desta forma, é possível que em condições de temperatura constante, o tempo de estabilização pode ser um pouco maior.

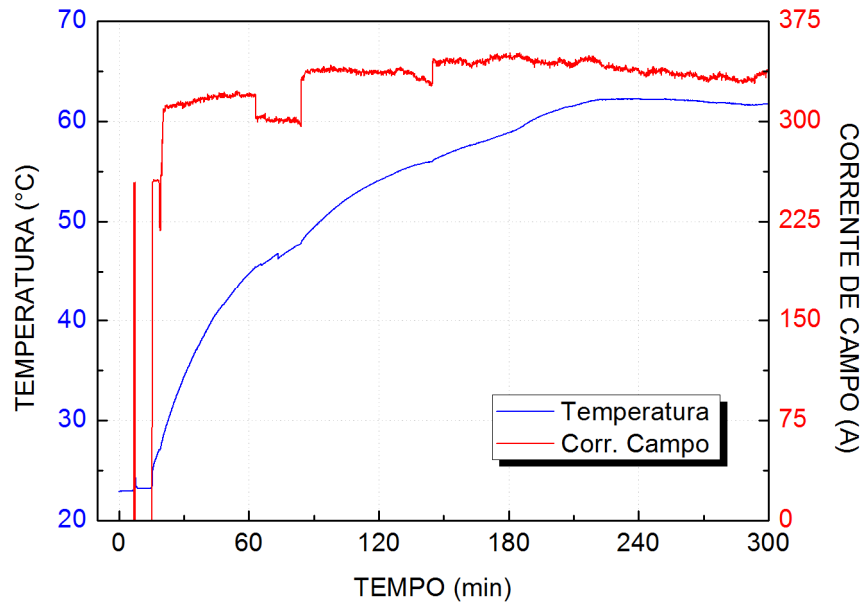


Figura 41. Gráfico da temperatura e corrente de campo até a estabilização.

No gráfico da Figura 42 observa-se que a potência ativa permanece constante com valor aproximado de 5,7 MW. Nota-se que variações da tensão de linha causam variações na potência reativa. Em alguns momentos ajusta-se a tensão do gerador de forma a se reduzir a potência reativa. De uma forma geral, observa-se uma tendência da potência reativa ser negativa no período (0 - 950 minutos) 04h00min PM do dia 05/09/2013 às 7h30min AM do dia 06/09/2013 e positiva no período (950 - 1400) 7h30min AM a 03h30min PM do dia 06/09/2013, devido a características de carga do sistema elétrico, diferença de tensão entre a linha e o gerador.

Entre 470 e 680 minutos ocorre uma redução do reativo até -0,75MVar, causando uma redução na temperatura de 62°C para 56°C. Aproximadamente no tempo 950 minutos ocorre uma inversão na potência reativa de -0,5 MVar para + 0,75 MVar, neste caso, para se manter a tensão do gerador é necessário que se aumente a corrente de campo, o que é possível comprovar no gráfico da Figura 40, desta forma a temperatura também aumenta,

partindo do valor de 57°C até o valor de 63°C. O reativo aumenta ainda mais, chegando ao valor máximo no tempo 1150 minutos com +1 MVar e temperatura de 66°C.

De uma forma geral, após a estabilização é possível correlacionar a corrente de campo à potência reativa, já que não há variação significativa na potência ativa após a rampa de carga, logo após o sincronismo da unidade ao sistema elétrico.

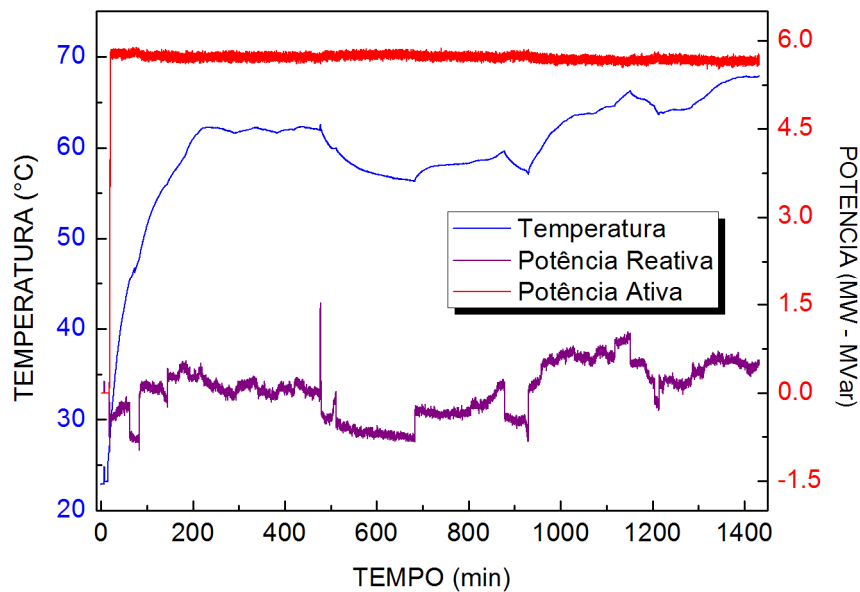


Figura 42. Gráfico da temperatura, potência ativa e reativa.

Os resultados obtidos mostraram a influência da temperatura ambiente na troca térmica, neste trabalho a temperatura ambiente próxima ao painel não foi medida, recomenda-se a medição destes valores para uma análise mais detalhada do comportamento.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a medição de temperatura na excitatriz estática da Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão (UHEDRJ) usando redes de Bragg em fibra ótica. A utilização de sensores a fibra ótica possibilitou a medição e aquisição de dados na ponte retificadora trifásica. Não foi encontrado na literatura resultados de medição neste sistema.

Os sensores elétricos convencionais apresentam algumas vantagens, como: custo reduzido, facilidade de aquisição e equipamentos de interface de baixo custo. Em contrapartida, o tempo de resposta é mais elevado, o que prejudicaria a análise da resposta da temperatura em função de parâmetros elétricos que apresentam variações rápidas. A dimensão reduzida dos sensores óticos permite que os sensores sejam posicionados de forma precisa, no local de maior temperatura. A imunidade à interferência eletromagnética permite que a temperatura seja monitorada sem a influência das correntes de chaveamento que poderiam causar uma medição errada.

Desta forma, foram desenvolvidos sensores FBGs para avaliar o tempo de resposta, comprovar a validade do encapsulamento escolhido e estudar possíveis características que desejávamos eliminar, como: sensibilidade cruzada e alteração das características do sensor quando fixado a outro material. Os sensores FBGs foram encapsulados, caracterizados e calibrados. Com a instalação dos sensores e aquisição dos dados foi possível conhecer o comportamento da excitatriz em diversas condições de operação: excitada a vazio, durante o sincronismo, rampa de carga, região de potência nominal e estabilidade térmica.

Conclui-se a partir dos dois ensaios que os dados obtidos se complementam. Na primeira etapa pôde-se comprovar a capacidade de aquisição, bem como a sensibilidade e tempo de resposta do sensor, válido para obtenção da resposta da temperatura em função da corrente de campo. Na segunda etapa pôde-se comprovar o tempo para estabilização da temperatura e variações devido à potência reativa, e como esta variável influencia na corrente de campo e conseqüentemente na temperatura dos tiristores. Observando-se os ensaios realizados é possível concluir que os sensores desenvolvidos são adequados ao uso pretendido. O adequado tempo de resposta, a imunidade à interferência e a repetibilidade após um ano instalado na ponte retificadora, permitem a aquisição de dados de comparação

para futuras manutenções e para melhor conhecimento do funcionamento da excitatriz estática em diversas condições de operação.

O uso de sensores a fibra ótica para medição de temperatura poderá auxiliar a manutenção na tomada de decisões com a detecção de problemas como: anomalias na condução dos tiristores, condução desequilibrada da ponte retificadora e na redução da vida útil de equipamentos subjacentes devido à temperatura. Outros problemas podem ser identificados, de forma indireta, pois conhecendo-se o comportamento em funcionamento normal, uma mudança neste padrão poderá indicar um defeito como por exemplo uma falha no rotor ou estator do gerador.

O monitoramento contínuo, usando sensores a fibra ótica, permite que seja realizada a manutenção preventiva do equipamento. Manutenções poderão ser realizadas de acordo com a mudança das características térmicas e não por tempo ou corretiva, com dano ao equipamento (queima ou redução de vida útil). Desta forma, ganha-se disponibilidade da unidade geradora, pois a manutenção será feita somente quando necessário, evitando-se paradas de unidade para manutenção de forma periódica e sem a necessidade. Ganha-se na redução de taxa de falha, pois poderá prever com antecedência uma variação no comportamento e programar uma parada para manutenção. A parada sendo programada permite uma otimização da mão-de-obra e deslocamento contribuindo para redução de custos de manutenção. Recomenda-se este tipo de monitoramento em usinas com histórico de falhas por aquecimento da excitatriz ou falhas graves em geradores.

Comprovou-se que o uso de redes de Bragg em fibra ótica com encapsulamento em aço inox possui adequado tempo de resposta e elimina-se a característica de sensibilidade cruzada. Destaca-se a repebilidade de medição após um ano da instalação, quando foram realizadas novas aquisições para estudo da estabilidade térmica.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns trabalhos futuros poderão ser realizados, como:

1 – Utilizar os resultados do trabalho para disseminar o conhecimento obtido do sistema e auxiliar em uma interpretação de problemas envolvendo ventilação em pontes retificadoras;

2 – Utilizar sensores a fibra ótica em outros equipamentos e sistemas de usinas hidrelétricas, como por exemplo: mancal escora, mancal do gerador, mancal da turbina, transformadores de excitação, transformadores elevadores e geradores;

3 – Desenvolver novos sensores com encapsulamentos cerâmicos ou tubos de vidro. Caracterizações realizadas com maior número de amostras e uma maior faixa de temperatura, reduzindo-se as incertezas devidas a repetibilidade e amostras;

4 – Obter o modelo térmico do sistema de excitação com os resultados deste trabalho e características dos dispositivos do painel. Desta forma, realizar simulações e estudos para melhorar a troca térmica e fluxo de calor no interior do painel. O modelo será útil para um monitoramento contínuo, pois uma determinada divergência em relação ao modelo, poderá sinalizar automaticamente, o início de um defeito no sistema de excitação ou no gerador.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLIL, R. **Sensores a fibra óptica com tecnologia FBG para medida de temperatura e alta tensão**, Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, 2010.

ANEEL – **Banco de Informações de Geração – Agência Nacional de Energia Elétrica** – Disponível em: <http://www.aneel.gov.br> – Acesso em: 15 de Novembro de 2012.

BAZZO, J. P. et al. **Thermal characteristics analysis of an igbt using a fiber bragg grating**. Optics and Lasers in Engineering, v. 50, p. 99–103, 2012.

BAZZO, J. P. et al. **Digital control system using a thermoelectric cell for temperature electronic devices testing**, in IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems, pp. 4–7, 2010,.

BORTOLOTTI, F. et al. **Packaging, Characterization and Calibration of Fiber Bragg Grating Temperature Sensors**, MOMAG, João Pessoa – Paraíba, 2012.

BRUCKNER, T., BERNET, S, **Estimation and measurement of junction temperatures in a three-level voltage source converter**, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 1, Jan. 2007.

CABRAL, P. - **Erros e incertezas nas medições** - Disponível em: www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf - Acesso em: Jul. de 2012;

CULSHAW, B. **Fiber-Optic sensors: Application and Advances**, ISSN 0733-8724, 2005.

CULSHAW, B., Kersey, A., **Fiber-Optic Sensing: A Historical Perspective**, IEEE J. Lightw. Technol., Vol. 26, No. 9, 2008.

ECKE, W, SCHMITT, M. W., **Fiber bragg gratings in industrial sensing**, IEEE OFC/NFOEC, 2013.

FUJII, K. et al. **Characterization and comparison of high blocking voltage IGBTs and IEGTs under hard and soft switching conditions**. IEEE Transactions on power electronics, Vol. 23, No. 1, Jan. 2008.

GUIDO, L., et al. **Componentes Dissipativos para Semicondutores de Potência**. Disponível em: [http://www.fem.unicamp.br/~assump/Projetos/2010/g10\(1\).pdf](http://www.fem.unicamp.br/~assump/Projetos/2010/g10(1).pdf). Acesso em: 03 de agosto de 2013.

HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S., “**Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication**”, Applied Physics Letters, vol. 32, p. 647-649, 1978.

HILL, K., MELTZ, G. “**Fiber bragg grating technology fundamentals and overview**,” Journal of Lightwave Technology, vol. 15, no. 8, pp. 1263 –1276, Aug. 1997.

INMETRO, Avaliação de dados de medição - **Guia para expressão de incertezas de medição** – JCGM 100:2008 – Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf- Acesso em: Mar. 2012.

ISMAIL, M. A. et al. Article **Bimetal Temperature Sensor for Solar Panel Inverters**. Sensors – p.p 8665 – 8673 – ISSN 1424 -8220, 2011.

KASHYAP, R., “**Fiber Bragg Grating**”, San Diego, Academic Press, 1999.

KERSEY, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., Putnan, M. A., E. J. Friebele, “**Fiber Grating Sensor**”, Journal of Lightwave Technology, vol. 15, p. 1442-1462, 1997.

KLOE, “**K-FBG Sensors**” - Página da web – Disponível em: <http://www.kloe.fr/en/our-solutions-and-services-sensors/sensors/k-fbg> - Acesso em: Mar. 2013.

MARTIN, C. SCHANE, J. L. **Inside a power module**, Laboratoire d’Eletrotechnique de Grenoble, France, IEEE, 2004.

MELTZ, G., MOREY, W. W., GLENN, W. H., “**Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method**”, Optics Letters, vol. 14, p. 823-825, 1989.

MENDES, A. et al. **Influence of the positive sequence voltage on the temperature of three-phase induction motors**. In: Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on. [S.l.: s.n.], p. 1 –6, 2010.

MENDEZ, A. **FIBER BRAGG GRATINGS SENSOR: A MARKET OVERVIEW** . Third European Workshop on Optical Fiber Sensors, Sept. 2007.

MOTTO, Jr. et al. **Thyristor (Diode) transient thermal impedance Modelling Including The Spatial Temperature Distribution During Surge and Overload Conditions**. Powerex Inc. IEEE Trans. Ind Applicat., vol. 2, 959-966, 1995.

OTHONOS, A., “**Fiber Bragg gratings**”, Review of Scientific Instruments, vol. 68, p. 4309-4341, 1997.

OTHONOS, A., Kalli, K, **“Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing”**, London, Artech House, 1999.

POSSETTI, G. et al. **“Metrological evaluation of optical fiber grating-based sensors: An approach towards the standardization,”** Lightwave Technology, Journal of, vol. 30, no. 8, pp. 1042 –1052, 2012.

PROBST, W et al. **“Thermal behavior of a high power generator exciter bridge measured by optical fiber sensors.”** Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, SPIE, 2013. v. 8794. p. 879443-1-879443-4.

SHEN, Y. et. al. **Switching loss analysis and modeling of power semiconductor devices based on an automatic measurement system**, IEEE, p. 853 – 858, 2006.

SILVA, E. V et al. **Temperature sensing in a 175MW power generator**, SPIE 8421, 22nd International Conference on optical fiber sensors, OFS, 2012.

SILVA, J. C. C. da. **MONITORAÇÃO DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS COM O EMPREGO DE SENSORES EM FIBRA ÓTICA**. TESE. Universidade Tecnológica e Federal do Paraná – 2006.

SIMAS, Eduardo - UFBA – **Dispositivos semicondutores** - Disponível em: http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/02-EletPot_Dispositivos_Semicondutores.pdf - Acesso em: 03/08/2013.

SOUZA, K. M. **VALIDAÇÃO DE MODELO TÉRMICO E ELÉTRICO DE MOTOR DE INDUÇÃO EMPREGANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA**, TRABALHO INDIVIDUAL – 2010.

SOUZA, K. M. et al. **Fiber Bragg Grating Sensors in Temperature Monitoring Of Three-Phase Induction Motors** – IMOC 2011 – pp. 862 – 866, 29 Nov 2011.

SOUZA, K. M. et al. **Validation of an induction motor thermal model by using fiber Bragg grating temperature sensors**, Proc. of SPIE Vol. 8421, 8421B3-1 (2012)

SOUZA, K. M. et al. **Optical fiber Bragg grating sensors applied on energy conversion systems**, IMOC 2013.

VIGESA, SADE – **Manual de operação e manutenção da Excitatriz Estática – UHEDRJ** – 1996.

VIM - INMETRO - **Vocabulário Interncaional de Metrologia - 2008** - Disponível em: http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/290/6/Conteudo_VIM_2008.pdf - Acesso em 06/2012;

WALTER, L. C. **Carta de Capabilidade**, disponível em:

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAarEAG/curvas-capabilidade-geradores-hidroeletricos> , Acesso em 31/10/2012.

WIKI: **Transferência de calor**, disponível em:

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Transferência de calor](http://pt.wikipedia.org/wiki/Transferência_de_calor)

Acesso em 09/2012.

WIKI: **Condutividade Térmica**, disponível em:

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Condutividade térmica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Condutividade_térmica)

Acesso em 07/2013.

WILLSCH, R., et al. **Optical fiber grating sensor networks and their application in electric power facilities, aerospace and geotechnical engineering**, pp. 49 – 54 vol.1, 2002.

WILLIAMSON, A. Cann, R. G., Williams, B. W., “**Calculation of Power Losses in Thyristor Converters**”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. IE-31, No. 2, pp. 192 – 200 (1984)

APÊNDICE A: PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA DISSERTAÇÃO

O desenvolvimento do encapsulamento, a caracterização, procedimento de calibração e expressão das incertezas de calibração resultaram na publicação de um artigo em congresso nacional – MOMAG 2012 (BORTOLOTTI, 2012).

A instalação dos sensores na UHEDRJ, aquisição e análise dos dados resultou na publicação de um congresso internacional – EWOFs 2013 (PROBST, 2013). Os resultados obtidos anteriormente em conjunto com diversos trabalhos do grupo de pesquisa resultaram na publicação de outro congresso internacional – IMOC 2013 (SOUZA, 2013).

APÊNDICE B: LISTA DE EVENTOS DO SISTEMA DE SUPERVISÃO – UHEDRJ

Após a instalação dos sensores na ponte retificadora ocorreu a partida da unidade para realização de ensaios funcionais do regulador de velocidade e relés de proteção do gerador. Foram realizadas quatro partidas na unidade, nas demais partidas apenas excitação com o gerador sem carga, na última partida ocorreu o sincronismo com o sistema elétrico. Na Tabela 12 é possível observar o estado em cada momento de tempo e correlacionar com os dados de temperatura mostrados nos gráficos.

Tabela 12. Lista de Eventos SSC – UHEDRJ – 28/09/2012.

Tempo	Tag	Mensagem	Valor	Estado
15:29:11.120	DRJ33PDF	DRJ Distribuidor Fechado	Desatuado	
15:29:11.120	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
15:29:13.740	DRJ39DM	DRJ REV Máquina em Movimento	Atuado	
15:29:14.389	DRJ44MPE	DRJ Máquina Parada Estabilizada-S	Desatuado	
15:29:14.389	DRJ44GP	DRJ Sinalização Grupo Parado(S)	Desligada	Partida
15:29:16.640	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Desatuado	
15:29:19.480	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Desatuado	
15:29:28.100	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Atuado	
15:29:33.100	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Atuado	
15:29:33.100	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
15:29:43.850	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Desatuado	
15:36:57.220	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Atuado	
15:36:57.220	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Desatuado	A vazio Excitada
15:36:57.220	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Atuado	
15:36:57.560	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Desatuado	
15:37:02.418	DRJ44GEV	DRJ Sinalização Grupo em Vazio -S	Atuado	
15:37:06.398	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Desligado	
15:54:22.585	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Ligado	
15:54:24.410	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Atuado	A Vazio
15:54:24.410	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Desatuado	
15:54:42.734	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Desligado	
15:56:01.790	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Desatuado	
15:56:01.800	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Atuado	A vazio Excitada
15:56:03.024	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Ligado	
15:56:07.984	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Desligado	
15:56:07.984	DRJ39EEEM	DRJ Discordância Estados Estáveis/MEM S	Desligado	
15:58:53.760	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Desatuado	A vazio
15:58:53.770	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Atuado	
15:58:53.844	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Ligado	
15:59:14.330	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Desatuado	
15:59:14.340	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Atuado	A vazio Excitada

15:59:15.234	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Desligado	
15:59:17.404	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Ligado	
15:59:23.604	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Desligado	
16:10:54.220	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Atuado	A Vazio
16:10:54.220	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Desatuado	
16:10:55.541	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Ligado	
16:11:16.931	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Desligado	
16:25:08.060	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Desatuado	A vazio Excitada
16:25:08.070	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Atuado	
16:25:09.928	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Ligado	
16:25:16.408	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Desligado	
16:27:58.920	DRJ43LRL	DRJ Chave Seletora QPE Local Manual	Desligada	Unidade Automático
16:27:59.508	DRJ43M	DRJ Comando do Grupo em Manual	Desligada	
16:34:10.060	DRJ43LRR	DRJ Chave Seletora QPE Remoto Automático	Desligada	
16:34:10.410	DRJ43LRL	DRJ Chave Seletora QPE Local Manual	Ligada	
16:34:13.687	DRJ43M	DRJ Comando do Grupo em Manual	Ligada	
16:34:25.157	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Ligado	A Vazio
16:34:25.830	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Atuado	
16:34:25.830	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Desatuado	
16:34:44.387	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Desligado	
16:34:44.670	DRJ63QRV	DRJ RHV Óleo Pressão Normal	Ligado	
16:35:53.030	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Desatuado	
16:35:53.190	DRJ33PDF	DRJ Distribuidor Fechado	Atuado	
16:35:53.640	DRJ65LSX	DRJ REV Controle Automático	Atuado	
16:35:53.960	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Desatuado	
16:36:22.990	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Atuado	
16:36:24.530	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Desatuado	
16:36:24.560	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Atuado	
16:36:24.780	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Desatuado	
16:42:09.260	DRJE1PER	DRJ Parada Emergência via REV/PLC/QPE	Atuado	
16:42:09.290	DRJ86E1	DRJ Parada de Emergência	Atuado	
16:42:09.545	DRJ44EPPE	DRJ Pedido Parada de Emergência (S)	Ligado	
16:42:11.290	DRJE1PER	DRJ Parada Emergência via REV/PLC/QPE	Desatuado	
16:42:46.500	DRJ39DM	DRJ REV Máquina em Movimento	Desatuado	
16:42:55.810	DRJ86E1	DRJ Parada de Emergência	Desatuado	
16:43:15.895	DRJ44MPE	DRJ Máquina Parada Estabilizada-S	Atuado	
16:43:55.895	DRJ44GP	DRJ Sinalização Grupo Parado(S)	Ligada	Parada
16:46:06.020	DRJ43LRL	DRJ Chave Seletora QPE Local Manual	Desligada	
16:46:06.380	DRJ43LRR	DRJ Chave Seletora QPE Remoto Automático	Ligada	
16:46:07.015	DRJ43M	DRJ Comando do Grupo em Manual	Desligada	
16:46:34.605	DRJ44GP	DRJ Sinalização Grupo Parado(S)	Desligada	Partida
16:46:34.605	DRJ44EPMV	DRJ Pedido de Marcha em Vazio (S)	Atuado	
16:49:03.400	DRJ65LSX	DRJ REV Controle Automático	Desatuado	
16:49:03.400	DRJ33PDF	DRJ Distribuidor Fechado	Desatuado	
16:49:05.360	DRJ39DM	DRJ REV Máquina em Movimento	Atuado	
16:49:05.360	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
16:49:08.684	DRJ44MPE	DRJ Máquina Parada Estabilizada-S	Desatuado	
16:49:09.830	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Desatuado	

16:49:21.060	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Atuado	
16:49:21.060	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Desatuado	A vazio Excitada
16:49:21.070	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Atuado	
16:49:22.014	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Ligado	
16:49:24.980	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Atuado	
16:49:26.090	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
16:49:26.974	DRJ44GEV	DRJ Sinalização Grupo em Vazio -S	Atuado	
16:49:26.974	DRJ44EPMV	DRJ Pedido de Marcha em Vazio (S)	Desatuado	
16:49:26.974	DRJ44GTR	DRJ Sinalização Grupo em Transição-S	Desatuado	
16:49:29.454	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Desligado	
16:49:34.090	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Desatuado	
16:49:59.840	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Desatuado	
16:49:59.850	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Atuado	A vazio
16:50:00.760	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Desatuado	
16:50:00.910	DRJ33PDF	DRJ Distribuidor Fechado	Atuado	
16:50:01.074	DRJ44EPPN	DRJ Pedido de Parada Normal (SER)	Atuado	
16:50:01.074	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Ligado	
16:50:01.430	DRJ65LSX	DRJ REV Controle Automático	Atuado	
16:50:01.700	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Desatuado	
16:50:20.604	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Desligado	
16:50:29.800	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Atuado	
16:50:29.860	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Desatuado	
16:50:30.110	DRJ33FGS	DRJ Gerador Freios Soltos	Desatuado	
16:50:30.110	DRJ33FGA	DRJ Gerador Freios Aplicados	Atuado	
16:50:30.110	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Atuado	
16:50:30.120	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Desatuado	
16:51:10.490	DRJ39DM	DRJ REV Máquina em Movimento	Desatuado	Parada
16:51:42.434	DRJ44MPE	DRJ Máquina Parada Estabilizada-S	Atuado	
16:51:45.234	DRJ44EPPN	DRJ Pedido de Parada Normal (SER)	Desatuado	
16:52:11.584	DRJ44GP	DRJ Sinalização Grupo Parado(S)	Desligada	Partida
16:52:12.430	DRJ65LSX	DRJ REV Controle Automático	Desatuado	
16:52:12.430	DRJ33PDF	DRJ Distribuidor Fechado	Desatuado	
16:52:12.430	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
16:52:12.430	DRJ65SDX	DRJ Válvula Fechamento Emergência Aberta	Atuado	
16:52:13.490	DRJ39DM	DRJ REV Máquina em Movimento	Atuado	
16:52:14.684	DRJ44MPE	DRJ Máquina Parada Estabilizada-S	Desatuado	
16:52:17.030	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Desatuado	
16:52:19.500	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Atuado	
16:52:19.610	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Desatuado	
16:52:29.010	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Atuado	
16:52:29.220	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Desatuado	A vazio Excitada
16:52:29.230	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Atuado	
16:52:29.564	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Ligado	
16:52:33.280	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Atuado	
16:52:33.280	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
16:52:36.074	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Desligado	A Vazio
16:52:36.074	DRJ44GEV	DRJ Sinalização Grupo em Vazio -S	Atuado	
16:52:36.074	DRJ44EPMV	DRJ Pedido de Marcha em Vazio (S)	Desatuado	

16:52:43.760	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Desatuado	
16:53:11.300	DRJ88MC	DRJ Disjuntor de Grupo Mola Carregada	Desatuado	
16:53:11.310	DRJ52GD	DRJ Disjuntor de Grupo Aberto	Fechado	
16:53:11.340	DRJ52GLX1	DRJ Disjuntor de Grupo Fechado	Fechado	Sincronismo
16:53:12.973	DRJ44GEV	DRJ Sinalização Grupo em Vazio -S	Desatuado	
16:53:12.973	DRJ44GA	DRJ Sinalização Grupo Acoplado -S	Atuado	
16:53:12.973	DRJ44EPMA	DRJ Pedido de Marcha Acoplado (S)	Desatuado	
16:53:13.293	DRJ44GA-SC	JD Máquina Sincronizada s/Carga	Atuado	
16:53:15.090	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Desatuado	
16:53:15.720	DRJ88MC	DRJ Disjuntor de Grupo Mola Carregada	Atuado	
16:58:43.680	DRJ33PD50	DRJ Distribuidor Abertura >=50%	Atuado	
16:58:58.120	DRJ33VDA	DRJ Válvula Difusora Aberta	Desatuado	
16:59:05.510	DRJ33VDF	DRJ Válvula Difusora Fechada	Atuado	
17:02:42.970	DRJ33PD50	DRJ Distribuidor Abertura >=50%	Desatuado	
17:02:50.700	DRJ33PD50	DRJ Distribuidor Abertura >=50%	Atuado	
17:02:50.700	DRJ33VDA	DRJ Válvula Difusora Aberta	Atuado	
17:02:50.700	DRJ33VDF	DRJ Válvula Difusora Fechada	Desatuado	
17:02:51.590	DRJ33PD50	DRJ Distribuidor Abertura >=50%	Desatuado	
17:04:09.580	DRJ86E1	DRJ Parada de Emergência	Atuado	
17:04:09.590	DRJ52GLX1	DRJ Disjuntor de Grupo Fechado	Aberto	
17:04:09.600	DRJ52GD	DRJ Disjuntor de Grupo Aberto	Aberto	
17:04:09.690	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Desatuado	
17:04:09.690	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
17:04:09.700	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Atuado	A vazio
17:04:10.080	DRJ33PDF	DRJ Distribuidor Fechado	Atuado	
17:04:10.080	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Desatuado	
17:04:10.421	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Ligado	
17:04:10.421	DRJ44EPPE	DRJ Pedido Parada de Emergência (S)	Ligado	
17:04:10.460	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Desatuado	
17:04:30.651	DRJ41D-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Aberto (Serial)	Desligado	
17:04:37.630	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Atuado	
17:04:37.640	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Desatuado	
17:05:06.110	DRJ86E1	DRJ Parada de Emergência	Desatuado	
17:05:09.120	DRJ39DM	DRJ REV Máquina em Movimento	Desatuado	
17:05:43.191	DRJ44GP	DRJ Sinalização Grupo Parado(S)	Ligada	Parada
17:05:43.191	DRJ44EPPE	DRJ Pedido Parada de Emergência (S)	Desligado	
17:07:10.431	DRJ44GP	DRJ Sinalização Grupo Parado(S)	Desligada	Partida
17:07:10.431	DRJ44EPMV	DRJ Pedido de Marcha em Vazio (S)	Atuado	
17:07:10.431	DRJ44EPMA	DRJ Pedido de Marcha Acoplado (S)	Atuado	
17:09:40.410	DRJ44MPPE	DRJ Máquina Parada Estabilizada-S	Desatuado	
17:09:40.890	DRJ39DM	DRJ REV Máquina em Movimento	Atuado	
17:09:40.890	DRJ33PDF	DRJ Distribuidor Fechado	Desatuado	
17:09:40.890	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
17:09:43.210	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Desatuado	
17:09:46.720	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Atuado	
17:09:46.730	DRJ14N30	DRJ REV Velocidade < 30%	Desatuado	
17:09:55.130	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Atuado	
17:09:55.330	DRJ41D	DRJ RAT Disjuntor de Campo Aberto	Desatuado	A vazio Excitada

17:09:55.330	DRJ41L	DRJ RAT Disjuntor de Campo Fechado	Atuado	
17:09:58.440	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Atuado	
17:09:58.640	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Ligado	
17:10:00.370	DRJ33PDSC	DRJ Distribuidor Posição sem Carga	Atuado	
17:10:00.370	DRJ271PDCCA	DRJ PDCCA Presença de Tensão TSA1	Atuado	
17:10:03.910	DRJ44GEV	DRJ Sinalização Grupo em Vazio -S	Atuado	
17:10:03.910	DRJ44EPMV	DRJ Pedido de Marcha em Vazio (S)	Desatuado	
17:10:03.910	DRJ41L-S	DRJ RAT Disjuntor Campo Fechado (Serial)	Desligado	A Vazio
17:10:04.390	DRJ44EST	JD Qualquer Estado Estável	Atuado	
17:10:09.870	DRJ14N101	DRJ REV Velocidade > 101%	Desatuado	
17:10:33.200	DRJ88MC	DRJ Disjuntor de Grupo Mola Carregada	Desatuado	
17:10:33.210	DRJ52GD	DRJ Disjuntor de Grupo Aberto	Fechado	
17:10:33.240	DRJ52GLX1	DRJ Disjuntor de Grupo Fechado	Fechado	
17:10:34.390	DRJ44GEV	DRJ Sinalização Grupo em Vazio -S	Desatuado	2º Sincronismo
17:10:34.390	DRJ44GA	DRJ Sinalização Grupo Acoplado -S	Atuado	
17:10:34.390	DRJ44EPMA	DRJ Pedido de Marcha Acoplado (S)	Desatuado	
17:10:34.390	DRJ44GTR	DRJ Sinalização Grupo em Transição-S	Desatuado	
17:10:34.600	DRJ44GA-SC	JD Máquina Sincronizada s/Carga	Atuado	
17:10:38.010	DRJ44GA-SC	JD Máquina Sincronizada s/Carga	Desatuado	
17:10:38.010	DRJ44GA-C	JD Máquina Sincronizada c/Carga	Atuado	
17:10:38.550	DRJ88MC	DRJ Disjuntor de Grupo Mola Carregada	Atuado	
17:11:41.240	DRJ33PD50	DRJ Distribuidor Abertura >=50%	Atuado	
17:11:57.650	DRJ33VDA	DRJ Válvula Difusora Aberta	Desatuado	
17:12:04.030	DRJ33VDF	DRJ Válvula Difusora Fechada	Atuado	

Tabela 13. Lista de Eventos SSC – UHEDRJ – 05/09/2013 a 09/09/2013.

Tempo	Tag	Mensagem	Valor	Estado
5 Set - 15:29:42	OperatorLog	DRJ Rearme Reles de Bloqueio 86M/86E Reset		Parada
5 Set - 15:29:45	DRJ44EPPE	DRJ Pedido Parada de Emergência (S)	Desligado	
5 Set - 15:29:45	DRJ86E1	DRJ Parada de Emergência	Desatuado	
5 Set - 15:29:55	OperatorLog	DRJ Comando Valvula Resfriamento Ativar		
5 Set - 15:30:01	DRJ33WRA	DRJ Válvula Resfriamento Aberta	Ligada	
5 Set - 15:30:01	DRJ80WVE	DRJ Vedação Eixo Vazão Normal	Atuado	
5 Set - 15:30:01	DRJ80WG	DRJ Trocadores Calor Vazão Normal	Atuado	
5 Set - 15:30:01	DRJ80WSME	DRJ ME Agua Serpentina Vazão Normal	Atuado	
5 Set - 15:30:01	DRJ80WSMG	DRJ MG Agua Serpentina Vazão Normal	Atuado	
5 Set - 15:30:36	OperatorLog	DRJ Comando Valvula Borboleta Bypass Ativar		
5 Set - 15:30:55	OperatorLog	DRJ Comando Valvula Borboleta Ativar		
5 Set - 15:31:07	DRJ33VBTF	DRJ Válvula Borboleta Turbina Fechada	Desligado	
5 Set - 15:34:00	OperatorLog	DRJ Comando Reset Regulador Hidraulico Velocidade Ativar		
5 Set - 15:34:03	DRJ65SDX	DRJ Válvula Fechamento Emergência Aberta	Atuado	
5 Set - 15:34:10	OperatorLog	DRJ Comando Regulador Velocidade Ligar Ativar		
5 Set - 15:34:13	DRJ44GP	DRJ Sinalização Grupo Parado (S)	Desligada	Partida

5 Set - 15:34:15	DRJ65LSX	DRJ REV Controle Automático	Desatuado	
5 Set - 15:34:31	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Atuado	
5 Set - 15:34:42	DRJRPM	DRJ REV Rotação da Unidade REV Rotação da Unidade Alta	614.4 rpm	
5 Set - 15:43:06	OperatorLog	DRJ Comando Excitatriz Ligar Ativar		A vazio - Excitada
5 Set - 15:43:15	DRJVG	DRJ Tensão Fase A/B Gerador DRJ Tensão Fase A/B Gerador Baixa	6.7 kV	
5 Set - 15:43:50	OperatorLog	DRJ Comando Excitatriz Desligar Ativar		A vazio - Desexcitada
5 Set - 15:44:05	OperatorLog	DRJ Comando Regulador Velocidade Desligar Ativar		
5 Set - 15:44:20	OperatorLog	DRJ Comando Valvula Borboleta Ativar		
5 Set - 15:45:12	OperatorLog	DRJ Comando Aplicar Freios Ativar		
5 Set - 15:45:22	DRJ39DM	DRJ REV Máquina em Movimento	Desatuado	Parada
5 Set - 15:45:40	OperatorLog	DRJ Comando Valvula Resfriamento Ativar		
5 Set - 15:46:02	DRJ43LRL	DRJ Chave Seletora QPE Local Manual	Desligada	
5 Set - 15:46:42	OperatorLog	DRJ Comando Desaplicar Freios Ativar		
5 Set - 15:46:53	OperatorLog	DRJ Comando Valvula Resfriamento Ativar		
5 Set - 15:47:10	OperatorLog	DRJ Parada de Emergência Ativar		
5 Set - 15:47:13	DRJ43LRR	DRJ Chave Seletora QPE Remoto Automático	Ligada	
5 Set - 15:47:13	DRJ33FGA	DRJ Gerador Freios Aplicados	Desatuado	
5 Set - 15:47:13	DRJ33FGS	DRJ Gerador Freios Soltos	Atuado	
5 Set - 15:47:17	DRJE1PER	DRJ Parada Eemergência via REV/PLC/QPE	Desatuado	
5 Set - 15:47:41	OperatorLog	DRJ Rearme Reles de Bloqueio 86M/86E Reset		
5 Set - 15:47:43	DRJ86E1	DRJ Parada de Emergência	Desatuado	
5 Set - 15:47:47	DRJ44EPPE	DRJ Pedido Parada de Emergência (S)	Desligado	
5 Set - 15:47:48	OperatorLog	DRJ Comando SSC Partida Unidade em vazio Ativar		
5 Set - 15:47:51	DRJ44GP	DRJ Sinalização Grupo Parado (S)	Desligada	Partida
5 Set - 15:47:51	DRJ33WRF	DRJ Válvula Resfriamento Fechada	Desligada	
5 Set - 15:47:51	DRJ33WRA	DRJ Válvula Resfriamento Aberta	Ligada	
5 Set - 15:47:51	DRJ80WVE	DRJ Vedação Eixo Vazão Normal	Atuado	
5 Set - 15:47:51	DRJ80WG	DRJ Trocadores Calor Vazão Normal	Atuado	
5 Set - 15:47:55	DRJ80WSME	DRJ ME Agua Serpentina Vazão Normal	Atuado	
5 Set - 15:47:55	DRJ80WSMG	DRJ MG Agua Serpentina Vazão Normal	Atuado	
5 Set - 15:49:06	DRJ33VBTF	DRJ Válvula Borboleta Turbina Fechada	Desligado	
5 Set - 15:51:21	DRJ65LSX	DRJ REV Controle Automático	Desatuado	
5 Set - 15:51:21	DRJ65SDX	DRJ Válvula Fechamento Emergência Aberta	Atuado	
5 Set - 15:51:39	DRJ14N95	DRJ REV Velocidade > 95%	Atuado	
5 Set - 15:54:40	OperatorLog	DRJ Comando SSC Partida Unidade Acoplado Ativar		
5 Set - 15:55:04	DRJ52GLX1	DRJ Disjuntor de Grupo Fechado	Fechado	Sincronizada
5 Set - 15:55:32	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
5 Set - 15:55:35	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.7 MVar	
5 Set - 15:56:13	DRJ33VDA	DRJ Válvula Difusora Aberta	Desatuado	

5 Set - 16:59:46	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.8 MVar	
5 Set - 17:00:10	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.9 MVar	
5 Set - 17:00:32	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
5 Set - 23:33:54	OperatorLog	DRJ RAT Comando Diminuir Tensão		
5 Set - 23:34:09	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Alta	0.0 MVar	
6 Set - 07:07:05	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
6 Set - 10:48:43	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Alta	0.5 MVar	
7 Set - 07:31:07	OperatorLog	DRJ RAT Comando Diminuir Tensão		
7 Set - 07:31:09	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Alta	0.4 MVar	
7 Set - 15:58:26	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.9 MVar	
7 Set - 15:59:13	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
7 Set - 23:36:51	OperatorLog	DRJ RAT Comando Diminuir Tensão		
7 Set - 23:37:01	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Alta	-0.1 MVar	
8 Set - 16:08:38	DRJRPM	DRJ REV Rotação da Unidade REV Rotação da Unidade Alta	600.0 rpm	
8 Set - 18:44:26	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.6 MVar	
8 Set - 18:52:06	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Alta	0.2 MVar	
8 Set - 18:52:10	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.6 MVar	
8 Set - 19:35:52	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.8 MVar	
8 Set - 20:21:41	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.9 MVar	
8 Set - 20:21:45	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
8 Set - 20:21:46	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.9 MVar	
8 Set - 20:21:49	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
8 Set - 20:21:50	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
8 Set - 23:42:54	OperatorLog	DRJ RAT Comando Diminuir Tensão		
8 Set - 23:43:26	OperatorLog	DRJ RAT Comando Diminuir Tensão		
8 Set - 23:43:30	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Alta	-0.1 MVar	
9 Set - 09:02:33	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.6 MVar	
9 Set - 09:02:43	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.6 MVar	
9 Set - 11:28:50	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.9 MVar	
9 Set - 11:32:40	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.9 MVar	
9 Set - 11:32:53	OperatorLog	DRJ RAT Comando Diminuir Tensão		
9 Set - 11:32:55	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
9 Set - 11:32:58	OperatorLog	DRJ RAT Comando Aumentar Tensão		
9 Set - 11:33:01	DRJVARG-S	DRJ RAT Potência Reativa (Serial) Baixa	-0.7 MVar	

APÊNDICE C: DETALHES TÉCNICOS

C.1 - TIRISTOR

O tiristor é o principal componente da ponte retificadora da UHEDRJ e possui as seguintes características:

Fabricante: Semikron - Modelo: SKT600/14 - Imáx: 600A - VRRM: 1400V

Datasheet disponível em:

<http://www.alldatasheet.com/datasheet-df/pdf/206390/SEMIKRON/SKT600/14E.html>

SKT 600



Capsule Thyristor

Line Thyristor

SKT 600

Features

- Hermetic metal case with ceramic insulator
- Capsule package for double sided cooling
- Shallow design with single sided cooling
- International standard case
- Off-state and reverse voltages up to 1800 V
- Amplifying gate

Typical Applications

- DC motor control (e. g. for machine tools)
- Controlled rectifiers (e. g. for battery charging)
- AC controllers (e. g. for temperature control)
- Recommended snubber network
e. g. for $V_{VRMS} \leq 400$ V:
 $R = 33 \Omega / 32$ W, $C = 1 \mu$ F



SKT

V_{RSM} V	V_{RRM} , V_{DRM} V	$I_{TRMS} = 1400$ A (maximum value for continuous operation) $I_{TAV} = 600$ A (sin. 180; DSC; $T_c = 86$ °C)		
900	800	SKT 600/08D		
1300	1200	SKT 600/12E		
1500	1400	SKT 600/14E		
1700	1600	SKT 600/16E		
1900	1800	SKT 600/18E		

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{TAV}	sin. 180; $T_c = 100$ (85) °C;	437 (620)	A
I_D	2 x P8/180; $T_a = 45$ °C; B2 / B6	400 / 560	A
I_{RMS}	2 x P8/180 F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	1060 / 1500	A
	2 x P8/180; $T_a = 45$ °C; W1C	440	A
I_{TSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	11500	A
	$T_{vj} = 125$ °C; 10 ms	10000	A
i^2t	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	660000	A ² s
	$T_{vj} = 125$ °C; 8,3 ... 10 ms	500000	A ² s
V_T	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 2400$ A	max. 2	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 1	V
r_T	$T_{vj} = 125$ °C	max. 0,4	mΩ
I_{DD} ; I_{RD}	$T_{vj} = 125$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}$; $V_{DD} = V_{DRM}$	max. 80	mA
t_{gd}	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
t_{gr}	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	2	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 125	A/μs
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C; SKT ...D / SKT ...E	max. 500 / 1000	V/μs
t_q	$T_{vj} = 125$ °C,	100 ... 200	μs
I_H	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 500	mA
I_L	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	500 / 2000	mA
V_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
I_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 200	mA
V_{GD}	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 0,25	V
I_{GD}	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 10	mA
$R_{th(f-c)}$	cont.; DSC	0,038	K/W
	sin. 180; DSC / SSC	0,04 / 0,082	K/W
$R_{th(f-c)}$	rec. 120; DSC / SSC	0,045 / 0,093	K/W
$R_{th(f-c)}$	DSC / SSC	0,007 / 0,014	K/W
T_{vj}		- 40 ... + 125	°C
T_{stg}		- 40 ... + 130	°C
V_{sol}		-	V~
F	mounting force	10 ... 13	kN
a			m/s ²
m	approx.	240	g
Case		B 10	

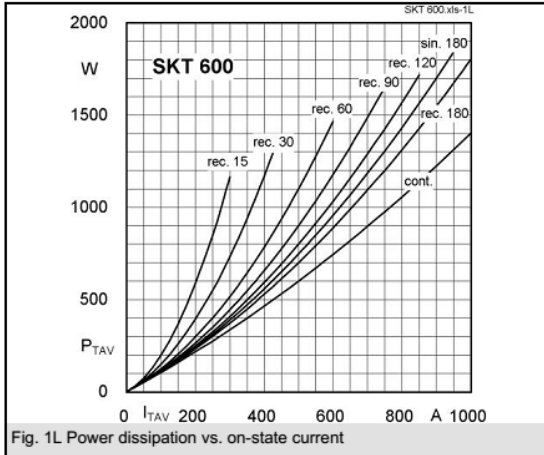


Fig. 1L Power dissipation vs. on-state current

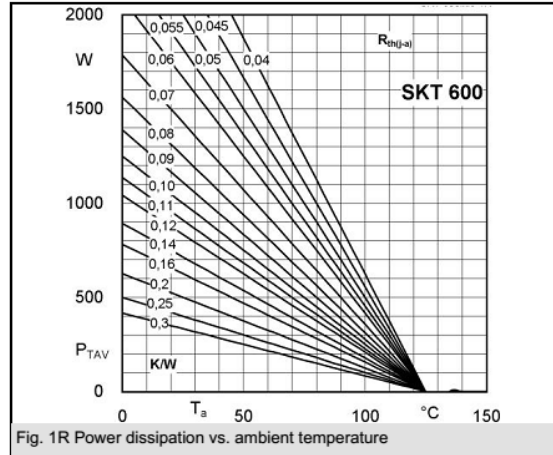


Fig. 1R Power dissipation vs. ambient temperature

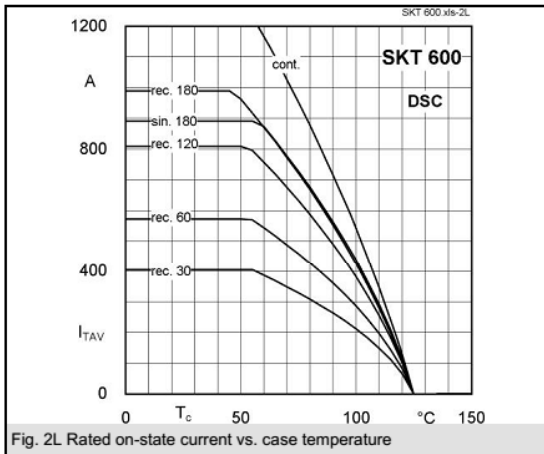


Fig. 2L Rated on-state current vs. case temperature

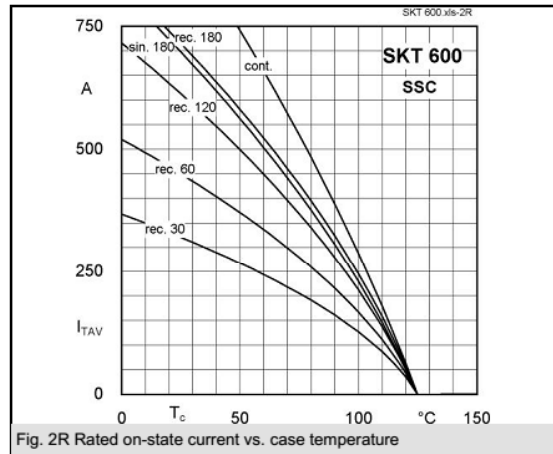


Fig. 2R Rated on-state current vs. case temperature

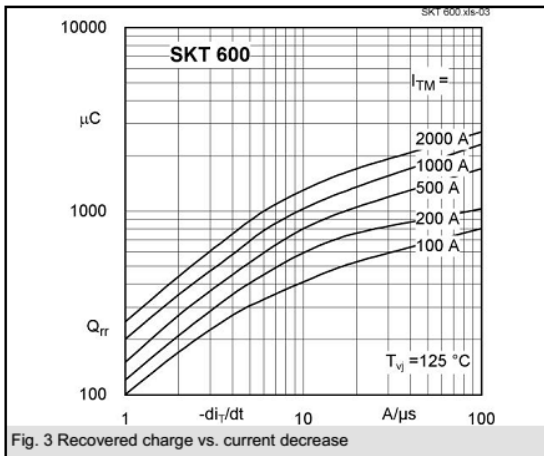


Fig. 3 Recovered charge vs. current decrease

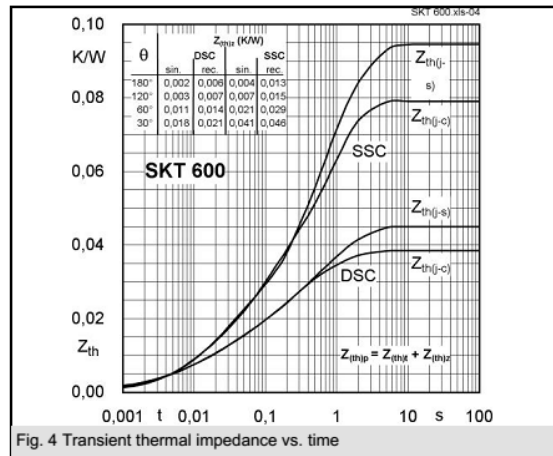


Fig. 4 Transient thermal impedance vs. time

SKT 600

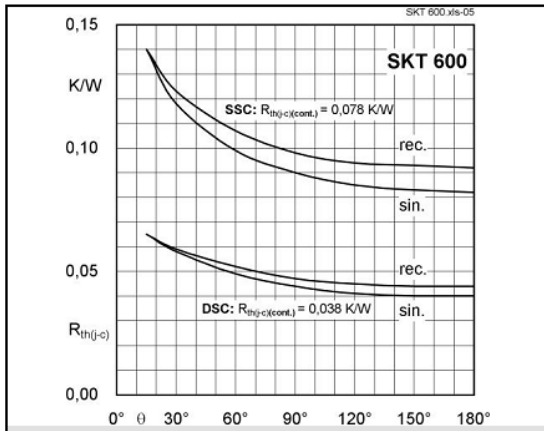


Fig. 5 Thermal resistance vs. conduction angle

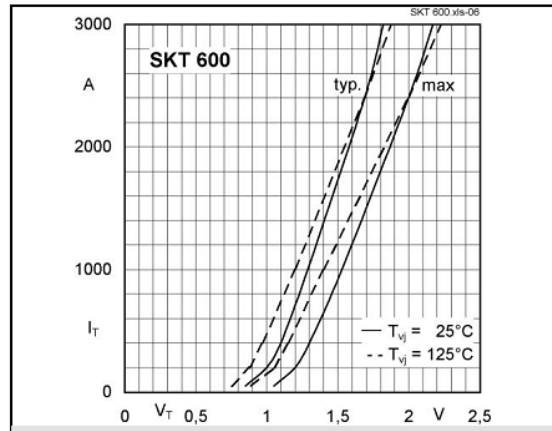


Fig. 6 On-state characteristics

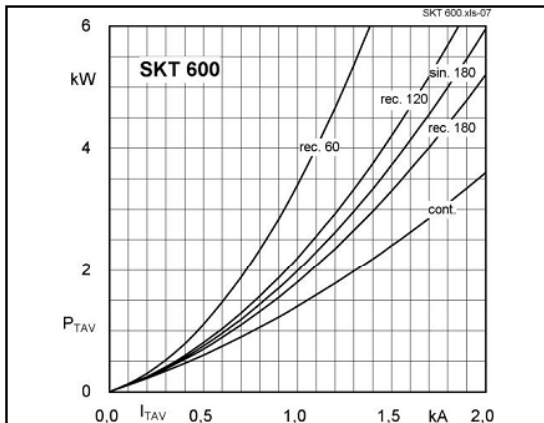


Fig. 7 Power dissipation vs. on-state current

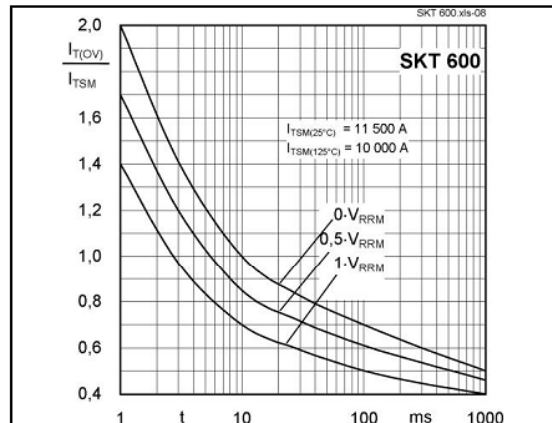
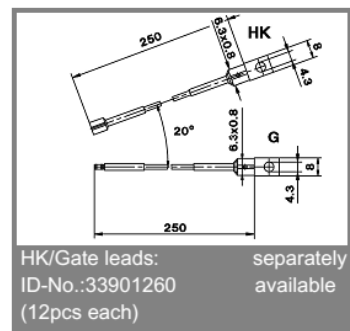
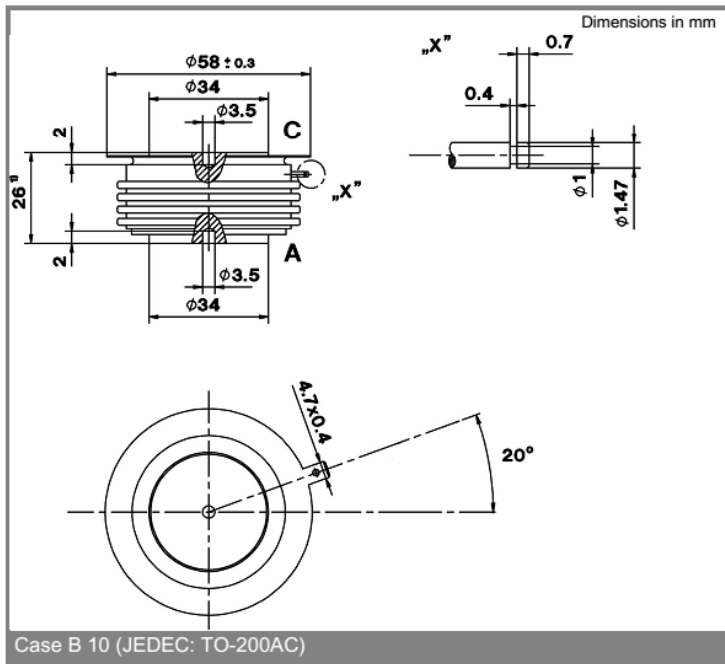
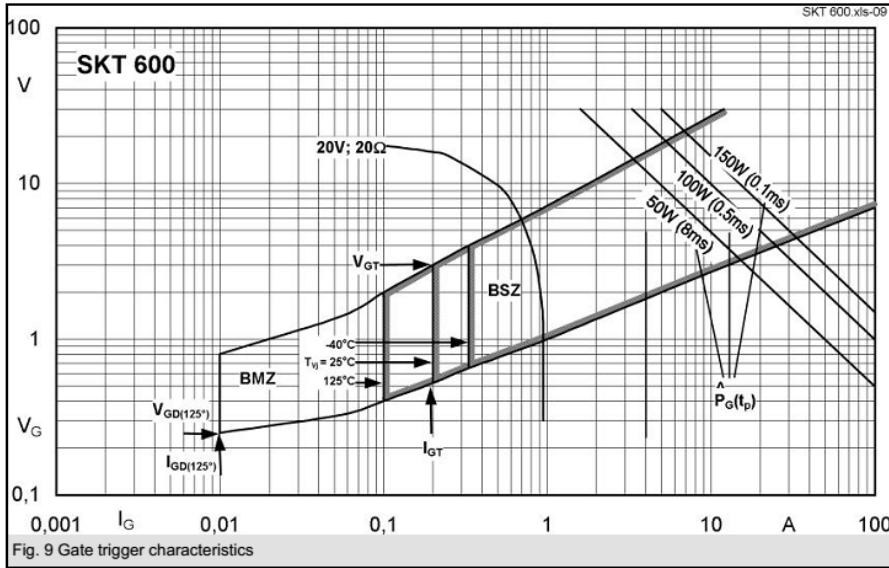


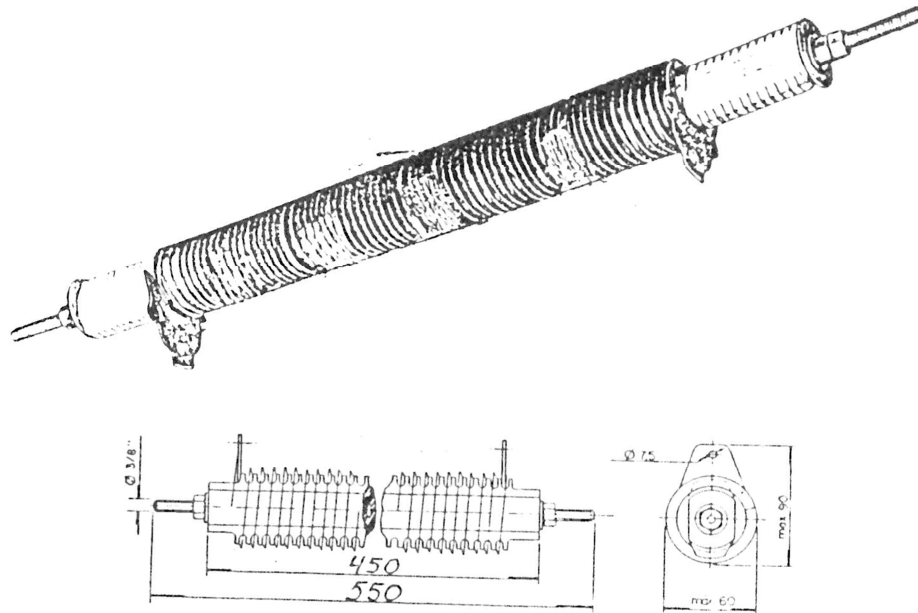
Fig. 8 Surge overload current vs. time



This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

C.2 - RESISTOR DE DESCARGA DE CAMPO

O resistor de descarga de campo tem como função descarregar a energia de campo do gerador em uma abertura do disjuntor de campo. Possui as seguintes características:



Fabricante: Eletele

$R=0,26$ ohms

$P=950W$

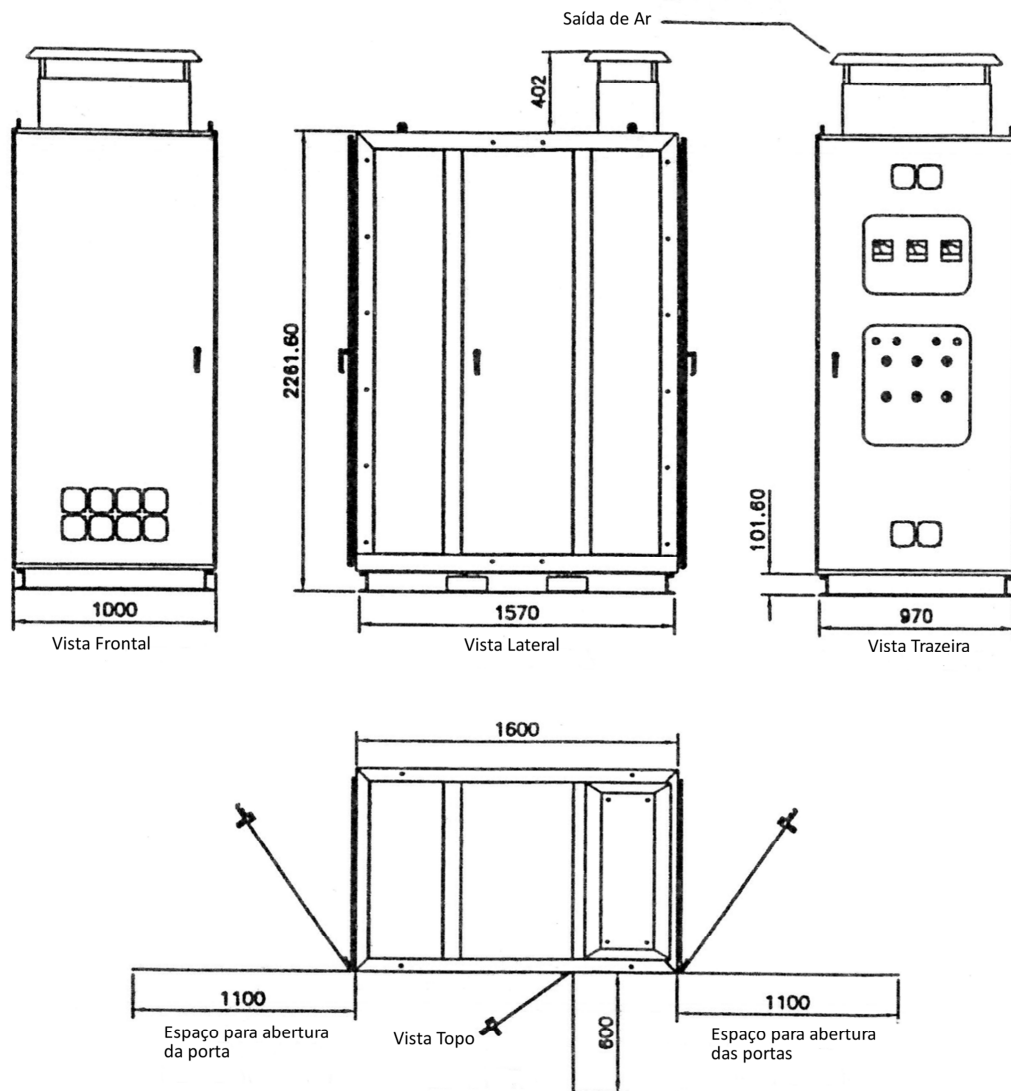
Tol.: 5%

Projetado para suportar corrente nominal de 441A em ciclos de trabalho de 1,5s ligado e 45s desligado.

C.4 - PAINEL ELÉTRICO DO REGULADOR DE TENSÃO

O painel elétrico do regulador de tensão abriga a ponte retificadora trifásica controlada e permite a troca térmica dos componentes de potência.

Vistas:



C.5 - VENTILAÇÃO FORÇADA

O sistema de ventilação é formado por três ventiladores e oito filtros, conforme características:

Ventiladores:

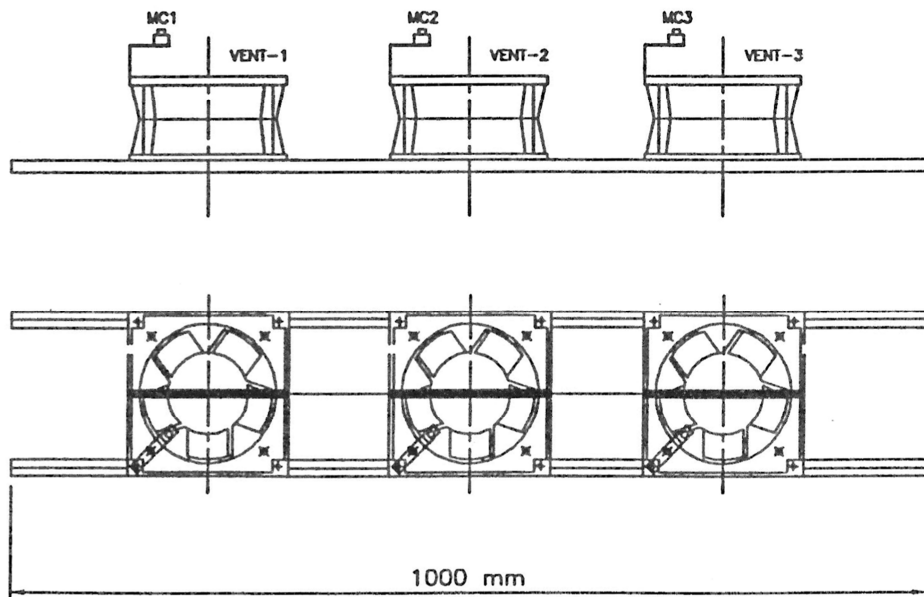
Fabricante: Ventisilva

Modelo: RAX-2

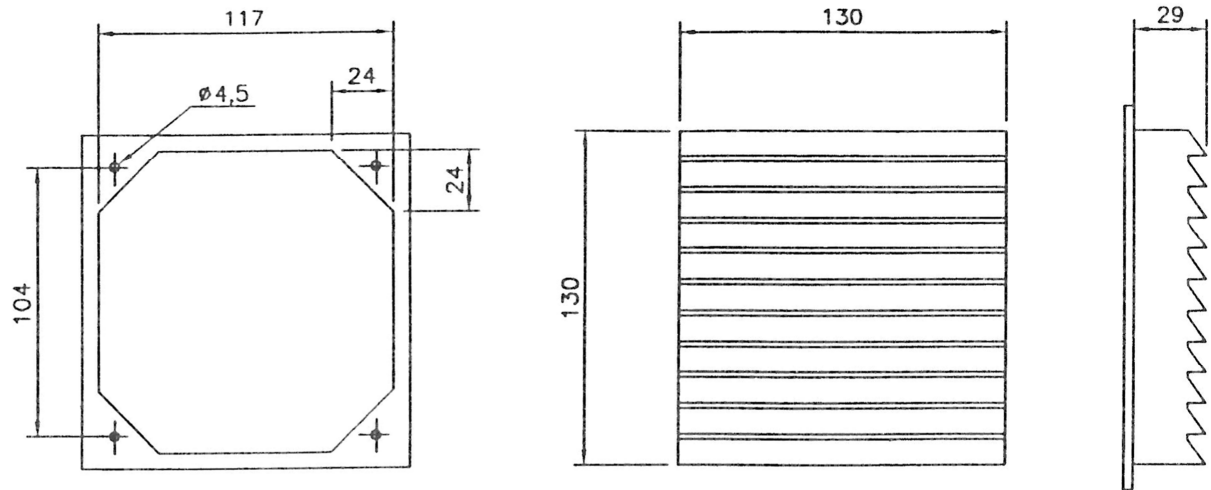
Tensão: 115Vac/60Hz

Potência: 110W

Vazão: 415L/s



C.5.1 Filtro



C.6 - DISSIPADORES DE CALOR

Os dissipadores de calor tem como função manter a temperatura dos tiristores dentro dos limites de operação do tiristor. Apresentam as seguintes características:

Material: Alumínio / Fabricante: Semikron

Pos.	Referência	Comprimento	Resistência térmica	Uso com semicondutor	Peso
P1	P1,2/100	100 mm	1,1 (50W) °C/W		660 g
P2	P5/100	100 mm	1,7 (35W) 1,55 (40W) 1,5 (40W)	SKB 15 SKB 25/SKD 25 SKB 30/SKD 30	280 g

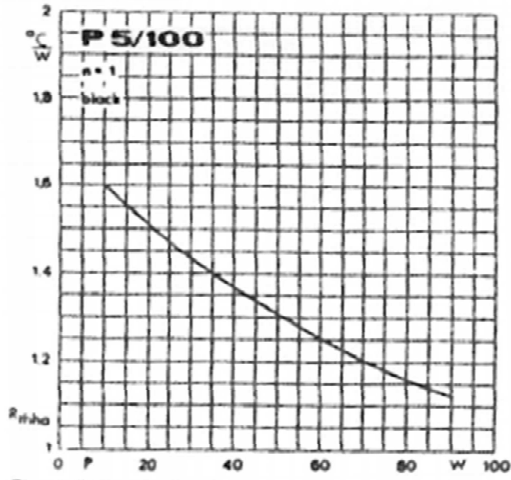


Fig. 1 Thermal resistance vs. dissipated power

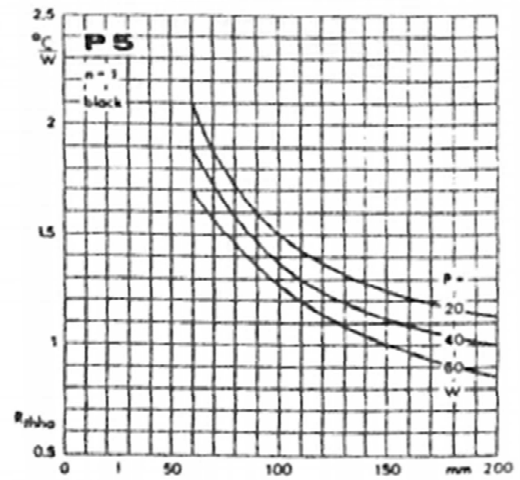
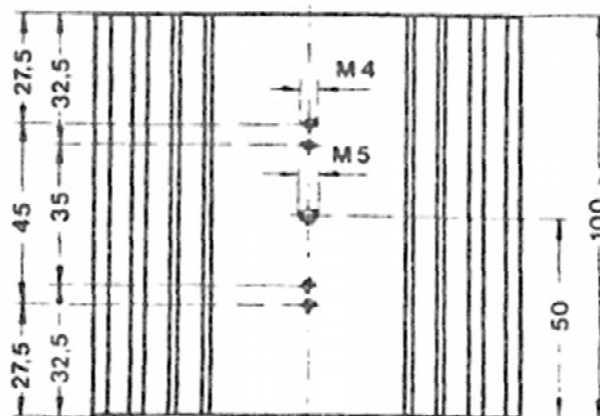
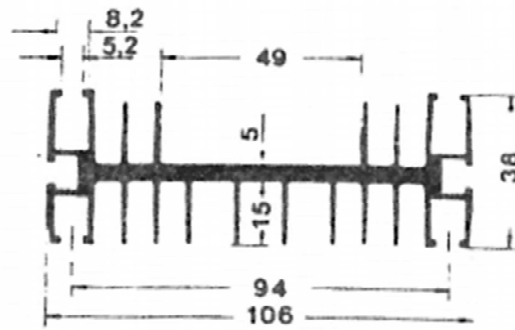


Fig. 2 Thermal resistance per component vs. length

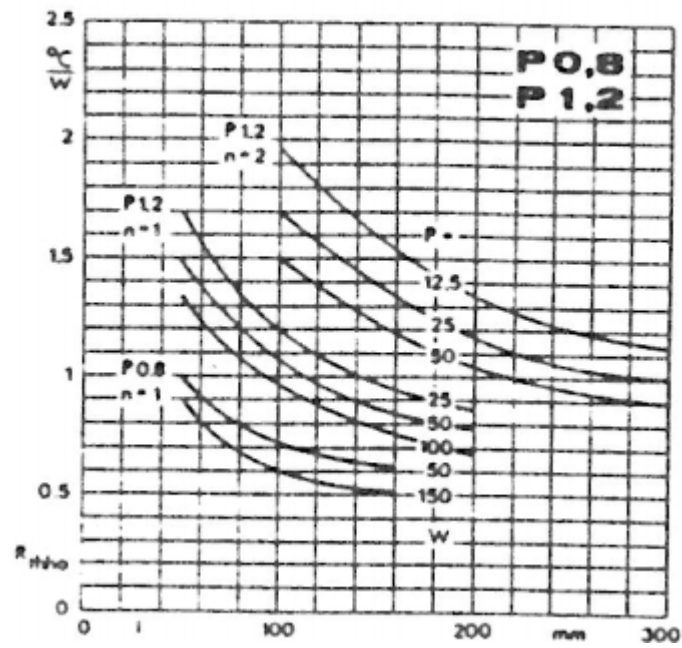
P5/100

(SKB 15, SKB 25, SKD 25, SKB 30, SKD 30)

$$\frac{w}{l} = 2,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

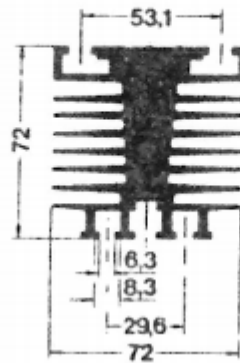


Dimensions in mm



P1,2

$$\frac{w}{l} = 6.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$



Instalação dos dissipadores de calor no painel

