

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**APLICAÇÃO DE UM SISTEMA ÓPTICO DE MEDIÇÃO DE
TEMPERATURA A ENSAIO DE ALTA TENSÃO COM PÁRA-RAIOS
DE ÓXIDO DE ZINCO**

Tarso Vilela Ferreira

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Junho de 2005



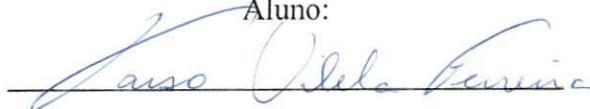
Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

**APLICAÇÃO DE UM SISTEMA ÓPTICO DE MEDIÇÃO DE
TEMPERATURA A ENSAIO DE ALTA TENSÃO COM PÁRA-RAIOS
DE ÓXIDO DE ZINCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Aluno:



Tarso Vilela Ferreira

Orientador:

Edson Guedes da Costa

Co-orientador:

José Everton Pombo de Farias

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Junho de 2005

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, e a meus pais.

Aos amigos e orientadores Profs. Edson e Everton, pelas diretrizes seguras e incentivo permanente.

Aos amigos Max, Estácio, Rodolfo e George, componentes fundamentais desta equipe já vencedora, e tão promissora.

Aos Professores e Funcionários do DEE, pelo apoio fundamental na formação de conhecimento técnico e pelo suporte dado para a realização deste trabalho.

Aos Fundos Setoriais ANEEL-CHESF/ATECEL, pelo financiamento da linha de pesquisa em que as atividades foram realizadas.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	5
2. Objetivos.....	7
3. Pára-raios de Óxido de Zinco.....	8
3.1. Características elétricas e térmicas.....	9
3.2. Aspectos Construtivos.....	11
4. Sensores de Temperatura a Fibra Óptica.....	15
4.1. Redes de Bragg em Fibras Ópticas.....	16
4.1.1. Técnicas Baseadas em Fibras de Banda Ajustável.....	18
4.1.2. Técnicas Baseadas em Filtros Fixos.....	19
4.2. O Equipamento Utilizado nos Ensaio: OIS-106.....	20
4.3. Ensaio Preliminares e de Aferição.....	24
4.3.1. Ajuste de Offset.....	25
4.3.2. Teste de coerência.....	26
5. Montagem do Ensaio com o Pára-Raios.....	26
5.1. Abertura do Pára-raios e Fixação dos Sensores Ópticos.....	27
5.2. Circuitos Elétricos e de Medição de Temperatura.....	32
5.2.1. Circuitos de alimentação, medição e aquisição de dados.....	32
5.2.2. Circuito óptico de medição de temperatura.....	34
6. Execução do Ensaio e Resultados Obtidos.....	36
8. Conclusões.....	42
Referências Bibliográficas.....	43

1. INTRODUÇÃO

A importância dos pára-raios, especialmente, os de óxido de zinco nos sistemas elétricos é indiscutível, dada à proteção que eles proporcionam aos demais equipamentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, quando da ocorrência de surtos de manobra ou atmosféricos.

Dentro da linha de pesquisa sobre pára-raios de óxido de zinco desenvolvida no Laboratório de Alta Tensão da UFCG, encontram-se vários tipos de ensaios, em vários níveis de tensão, e dos quais muitos parâmetros elétricos, térmicos e mecânicos são coletados e interpretados no laboratório para realização de diagnósticos de defeitos, modelagem via software, monitoramento, validação de modelos, dentre outras finalidades.

Os parâmetros térmicos são diretamente proporcionais à energia dissipada por efeito Joule devido à condução das pastilhas varistoras. Além de refletir o nível de corrente que circula no equipamento, gradientes de temperatura localizados podem denunciar defeitos de várias naturezas.

Inicialmente, a metodologia utilizada para a medição das temperaturas empregou termômetros eletrônicos baseados em termopares fixados ao corpo do pára-raios, em pontos de interesse. A montagem utilizando termômetros eletrônicos pode ser vista na Figura 1.

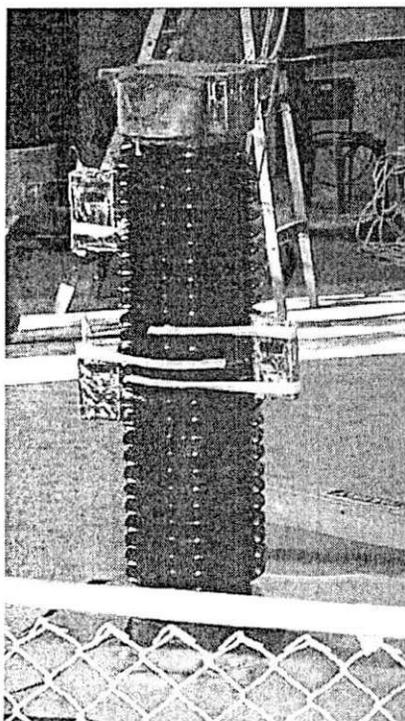


Figura 1. Pára-raios de 69 kV com termômetros fixados.

Naturalmente, os termômetros eram fixados e mantidos no ponto mais próximo possível dos respectivos locais onde a temperatura era medida. Eles eram revestidos com papel condutor e mantidos suficientemente afastados dos pesquisadores. As recomendações são justificadas pela submissão de alta tensão aos termômetros durante o ensaio. Os valores apresentados nos visores dos termômetros eram anotados manualmente e depois passados para o computador.

Além do trabalho braçal envolvido nesta metodologia de aquisição dos valores de temperatura, especialmente em ensaios com algumas horas de duração, havia também um problema de estabilidade dos circuitos eletrônicos dos termômetros, quando imersos em campos eletromagnéticos muito intensos, especificamente, os oriundos de tensões acima de 69 kV. Nestas ocasiões os termômetros apresentavam valores oscilatórios ou irreais, algumas vezes deixavam de funcionar temporariamente ou danificavam-se permanentemente. Outro efeito danoso da presença dos intensos campos elétricos é o descarregamento acelerado das baterias que alimentam os termômetros. Baterias que durariam meses em operação normal, descarregam-se em semanas quando expostas aos campos eletromagnéticos intensos dos ensaios.

Como estão incluídos nas pesquisas pára-raios que operam em tensões bem maiores que 69 kV, fez-se necessária a escolha de outro método de medição, que fosse imune aos intensos campos eletromagnéticos existentes na região do ensaio. Após se considerarem várias possibilidades, concluiu-se que o sistema mais adequado seria um termômetro baseado em fibras ópticas. Dentre estes, os mais confiáveis e acessíveis atualmente são os que utilizam a tecnologia de Redes de Bragg.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo servir como Trabalho de Conclusão de Curso, habilitando a colação de grau de Tarso Vilela Ferreira, como Engenheiro Eletricista. No texto é avaliado o comportamento de um sistema de medição de temperatura baseado em sensores a fibras ópticas, quando aplicado a um ensaio de alta tensão com pára-raios de óxido de zinco para obtenção das curvas de aquecimento e resfriamento, visando validação de um modelo eletrotérmico computacional. Também é foco deste texto registrar os métodos de ajustes preliminares e manejo do sistema de medição de temperatura baseado em fibras ópticas, bem como demais processos preparativos. O ensaio e seus preparativos foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande.

3. PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

Em sistemas de potência podem ocorrer sobretensões de níveis de intensidade muito superiores à tensão nominal do sistema, variando não só de intensidade como também em tempo de duração. Caso os sistemas não apresentassem dispositivos de proteção contra sobretensões seria necessário que a classe de isolamento dos equipamentos fosse elevada o suficiente para suportar estes níveis de tensão. Na Figura 2 pode ser visto os diversos níveis de tensão e o tempo médio de duração de cada surto.

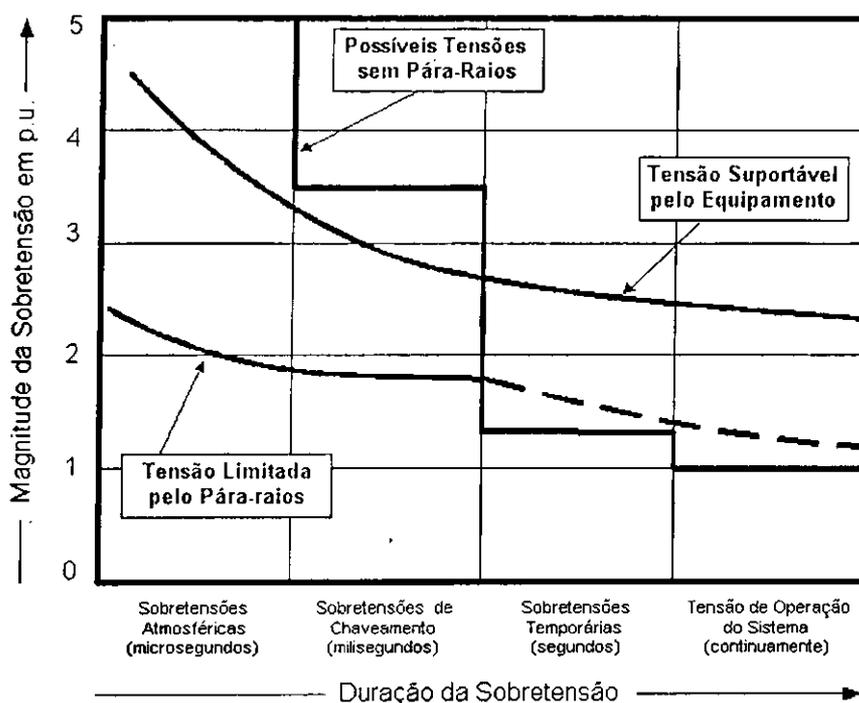


Figura 2. Magnitude das sobretensões versus a faixa de tempo de sua duração média.

A evolução das características construtivas dos dispositivos de proteção origina-se na simples instalação de centelhadores em paralelo aos equipamentos, passando pelos pára-raios convencionais de carboneto de silício (SiC) e mais recentemente, os pára-raios sem centelhadores, à base de óxido de zinco, também conhecido como de óxido metálico. Os pára-raios de carboneto de silício apresentam inúmeras deficiências, mas mesmo apresentando desempenho inferior, ainda existe um elevado número de pára-raios em carboneto de silício instalados no Brasil. Contudo, os pára-raios novos instalados hoje em dia são construídos à base de óxido de zinco.

3.1. Características elétricas e térmicas

Um pára-raios ideal funciona da seguinte maneira: para um nível de tensão menor que a sua tensão nominal o pára-raios funciona como uma chave aberta; para um nível de tensão superior a sua tensão nominal o pára-raios funciona como uma chave fechada, fazendo com que o surto flua na direção da terra. Na Figura 3 pode ser visto a curva característica tensão *versus* corrente de um pára-raios real e de um pára-raios ideal. A curva V-I não linear se deve as características extremamente não lineares das pastilhas de óxido de zinco.

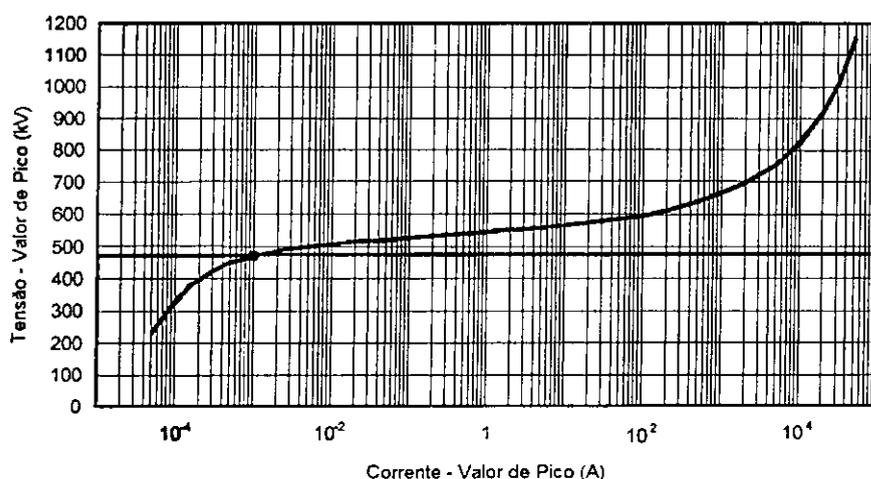


Figura 3. Curva tensão corrente de um pára-raios real e um pára-raios ideal.

Na Figura 4 pode ser vista a curva característica V-I de um pára-raios fase-terra conectado em um sistema de 420 kV. Na curva estão indicados alguns pontos característicos definidos por norma para os pára-raios que são listados a seguir:

- **Corrente de fuga** - É a corrente que flui pelo pára-raios quando o mesmo está sujeito à tensão de pico do sistema.
- **Tensão de operação contínua** - É a tensão em frequência industrial na qual o pára-raios pode funcionar sem nenhum tipo de restrição. Geralmente a tensão de operação contínua é superior a maior tensão fase-terra existente no sistema.
- **Tensão nominal** - Na verdade, não representa a tensão na qual o pára-raios pode ficar submetido continuamente. Ela representa a capacidade do pára-raios de suportar sobretensões temporárias no sistema. O pára-raios só deve ficar exposto a este nível de tensão por 10 segundos, alguns fabricantes permitem um tempo de até 100 segundos.

- **Corrente de descarga nominal** - É o valor de pico do pulso de corrente que é usado para classificar o pára-raios. Existem cinco diferentes valores para essa corrente: 1,5 kA, 2,5 kA, 5 kA, 10 kA e 20 kA. Na curva característica mostrada ela é de 10 kA.
- **Tensão residual** - É a tensão no pára-raios quando a corrente de descarga nominal flui pelo mesmo.

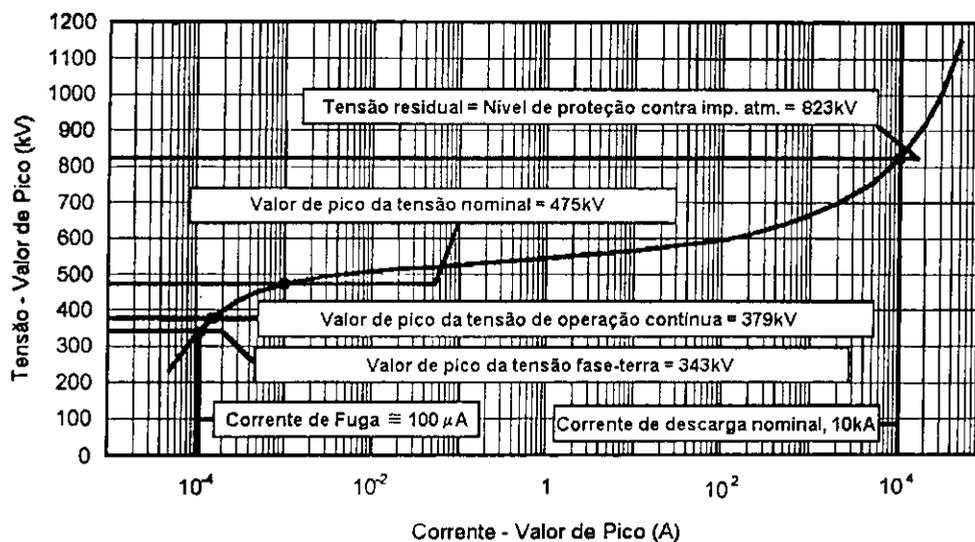


Figura 4. Curva característica do pára-raios.

Durante um surto as pastilhas de óxido de zinco do pára-raios sofrem um grande esforço, tanto térmico quanto mecânico. Em um surto de alguns micra ou mesmo milissegundos pode ocorrer um aumento considerável da temperatura, além da presença de grandes forças de tração e compressão agindo internamente nas pastilhas. A heterogeneidade da estrutura granular da pastilha pode contribuir para uma condução não uniforme no material, criando regiões quentes, causando degradação do material. A não uniformidade pode acarretar em pequenas rachaduras nas pastilhas ou, até mesmo, a perfuração da mesma. Para evitar que isso ocorra é necessário que a pastilha se apresente bastante homogênea e livre de impurezas.

Outra característica importante é a capacidade de absorção térmica. Ela é caracterizada como a quantidade de energia que pode ser injetada no pára-raios de modo que ele ainda possa voltar a sua temperatura normal de operação. Quando ocorre um surto, há um aumento da temperatura interna do pára-raios. Devido ao fato da porcelana não ser um bom condutor térmico, é difícil para o pára-raios dissipar essa energia para o meio exterior. Como a resistência das pastilhas é dependente da temperatura quando ocorre um aquecimento das mesmas, há um aumento da corrente, que acaba por gerar mais calor. Se as pastilhas atingirem

ao ponto onde o calor gerado é maior do que a capacidade do pára-raios de dissipá-lo pode ocorrer o que se chama de avalanche térmica, e o pára-raios passa a aquecer até se destruir. Todo o processo pode durar horas ou apenas alguns minutos.

3.2. Aspectos Construtivos

Existem muitos modelos de pára-raios disponíveis no mercado, para vários níveis de tensão e aplicação. Cada um deles tem uma estrutura construtiva diferente. O pára-raios utilizado nos ensaios é do modelo Siemens 3EP2. A série 3EP da Siemens é uma família de pára-raios com invólucro de porcelana, que atuam na faixa de até 800 kV. Para o 3EP2, duas destas colunas são associadas em série para tensão de 211 kVef, conforme Figura 5(a), onde também está presente um anel equalizador. Na Figura 5(b) está mostrada a fotografia de uma única coluna. Para efeito de ensaios de validação de modelo eletrotérmico, como o que será aqui descrito, não é necessário ensaiar ambas as colunas, assim, todo o ensaio foi realizado com apenas uma.

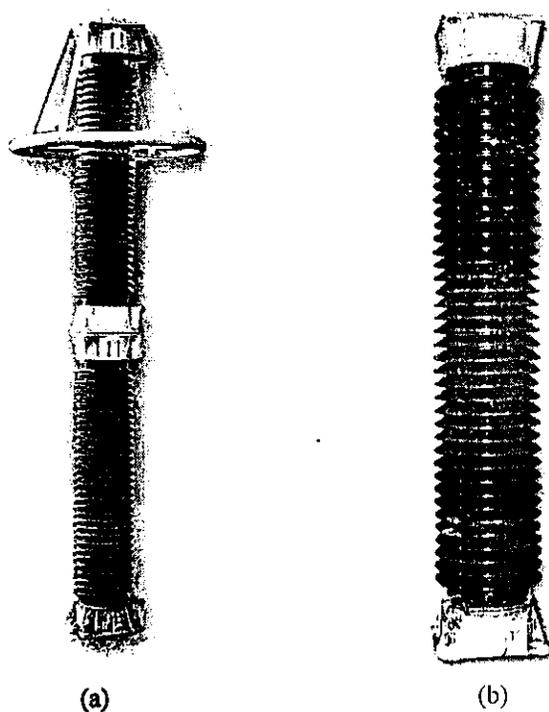


Figura 5. (a) Fotografia de uma das colunas do modelo 3EP2 (b) Fotografia de uma coluna 3EP.

Na Figura 6 pode ser visto um diagrama detalhado do equipamento ensaiado, juntamente com um corte transversal da porcelana, onde se observam todas as peças que constituem o pára-raios.

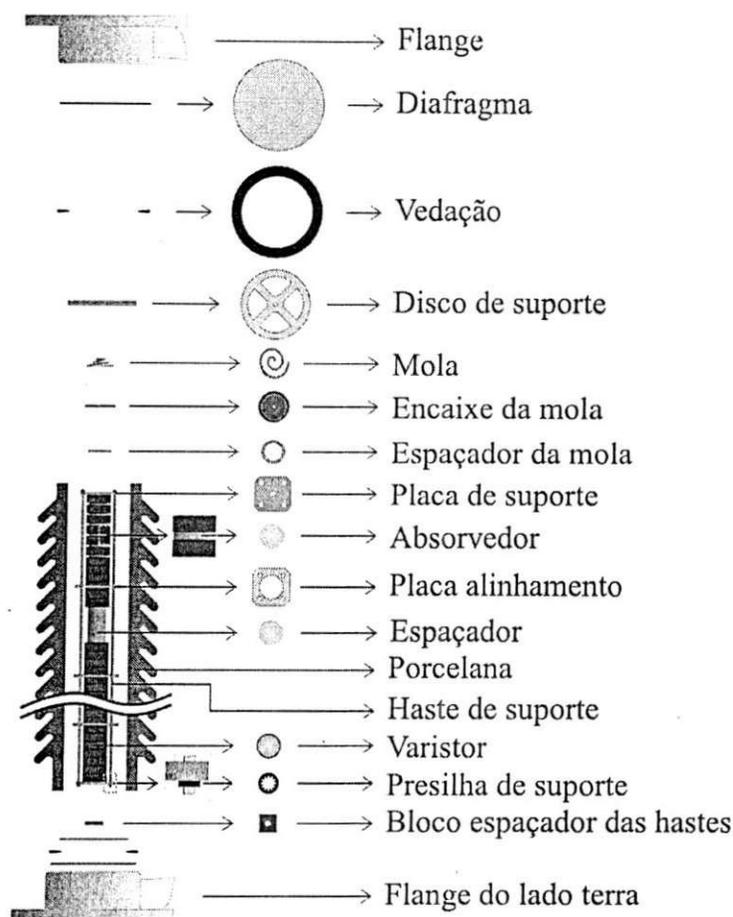


Figura 6. Diagrama explodido do 3EP ensaiado.

O flange do lado fase faz a vedação do equipamento, contudo a estanqueidade é mantida pelo diafragma e pela borracha de vedação. O flange é preso à porcelana com cimento à base de enxofre, e é idêntica ao flange do lado terra. O cimento a base de enxofre possui uma secagem mais rápida e não apresenta problemas de corrosão com alumínio. É feito de metal e serve também como ponto de conexão de alta tensão. Possui um duto de saída para que em caso de alta pressão interna, após a ruptura do diafragma, os gases possam circular e o arco elétrico se dê pelo meio externo.

O diafragma é um disco fino de metal (geralmente zinco ou aço de alta qualidade) que funciona como válvula de segurança. Em casos de surtos de alta intensidade pode haver uma descarga através do vão interno, entre as pastilhas e a porcelana do pára-raios. Com o aumento da temperatura e da pressão interna do gás pode ocorrer a explosão da porcelana. Nestes casos de pressão interna perigosamente alta, o diafragma rompe-se e permite que o gás quente flua pelos dutos de saída dos flanges. Como os gases saem ionizados e sobre pressão, o surto passa

então a fluir pelo lado externo do pára-raios propagando o arco elétrico fora do equipamento. O lado terra também dispõe de um diafragma.

A borracha de vedação fica entre a porcelana e o diafragma. No processo de fechamento, antes que o enxofre seja aplicado, a borracha está suficientemente comprimida entre a porcelana e o diafragma, garantindo vedação hermética. Ambos os lados, fase e terra têm borrachas de vedação.

O disco de suporte é feito de uma chapa de metal de três milímetros de espessura, e dá a sustentação mecânica à coluna. Apóia-se entre a porcelana e o flange, e fica dentro do furo da borracha de vedação, concentricamente, tocando o diafragma. Tem esta geometria vazada para permitir a circulação de gases se o diafragma vier a romper. Há um disco de suporte em cada lado do equipamento.

Mola: garante que a coluna vai estar devidamente comprimida dentro do invólucro de porcelana, facilitando contato elétrico entre as partes da coluna e proporcionando maior estabilidade mecânica. O encaixe da mola serve apenas para nivelar o contato da mola com o seu espaçador.

O espaçador da mola tem a mesma função dos demais espaçadores, apesar de não ficar junto com os varistores. Evita que a coluna fique solta ou que as pontas das hastes de suporte toquem o disco de suporte, o que manteria a coluna firme dentro do invólucro, mas sustentada pelas hastes de fibra de vidro reforçada, o que não garantiria o fluxo de corrente elétrica nem calor pelos varistores.

A placa de suporte sustenta os varistores e espaçadores na coluna, e é mantida presa às hastes de suporte pelas presilhas de suporte. Há uma placa no lado fase e outra no lado terra.

Os absorvedores são discos maciços e são freqüentes apenas no topo da coluna (lado fase) onde o campo elétrico é mais intenso e os varistores são mais exigidos. Sua função não é dar altura à coluna, tal os espaçadores, mas sim, absorver calor rapidamente.

As placas de alinhamento neste modelo de pára-raios são quatro. Construídas de fibra de vidro reforçada, elas trabalham junto com as hastes de suporte para garantir que a coluna permanecerá alinhada dentro da porcelana, e que os varistores e espaçadores se manterão concêntricos.

Os espaçadores são tubos de alumínio com discos nas terminações. Os discos garantem um contato homogêneo com as pastilhas. Têm a função de fazer com que a parte ativa do pára-

4. SENSORES DE TEMPERATURA A FIBRA ÓPTICA

O desenvolvimento das telecomunicações ópticas teve seu início na década de 1970 quando fibras com atenuação suficientemente baixa para permitir a propagação da luz a distâncias superiores a 1 km começaram a ser produzidas. Desde o início grandes avanços foram alcançados e as dimensões deste mercado vêm crescendo de forma ininterrupta. Hoje se pode dizer que o mundo está totalmente ligado por fibras ópticas que cruzam os oceanos conduzindo informações a taxas superiores a 10 gigabits por segundo. Juntamente com as fibras de altíssima qualidade, fontes luminosas, fotodetetores, acopladores ópticos, ferramentas e equipamentos especiais foram desenvolvidos e estão hoje disponíveis comercialmente a preços acessíveis.

Desde o início das atividades de pesquisa voltadas para o setor de telecomunicações, esforços paralelos têm sido conduzidos por diversos grupos visando a desenvolvimento de técnicas de medição utilizando fibras ópticas. Os principais motivos para tanto são as características inerentes às fibras ópticas como, baixo peso, flexibilidade, longa distância de transmissão, baixa reatividade da material, isolamento elétrico e imunidade eletromagnética. Além destas existe, em muitos casos, a possibilidade de se multiplexar os sinais de vários sensores, inclusive de grandezas diferentes, e até mesma a possibilidade se realizar medidas continuamente distribuídas ao longo da fibra sensora.

Hoje, sensores a fibra óptica são ainda pouco mais caros que os seus concorrentes convencionais. Por outro lado apresentam inúmeras vantagens que torna sua utilização atrativa para algumas aplicações onde tecnologias mais tradicionais têm se mostrado ineficientes. De fato, são nos setores: aeroespacial, de infra-estrutura e de petróleo que a utilização de sensores a fibra óptica, para o monitoramento de diferentes grandezas, tem apresentado o maior potencial de crescimento.

Quanto ao princípio de operação, sensores a fibra óptica são sensores ópticos que utilizam fibras como meio de conexão para a luz entre o mensurando e a região de leitura. Pode-se dividi-los entre extrínsecos e intrínsecos. Na primeira categoria estão aqueles em que a fibra serve simplesmente para guiar a luz e o efeito óptico a ser medido ocorre fora da fibra, como por exemplo, os sensores de corrente e tensão elétricas. No segundo caso, a fibra serve também como meio onde ocorre o acoplamento entre o mensurando e a luz, a que torna os sensores

raios tenha a altura necessária que garanta a distância de escoamento da parte externa do invólucro, e ajudam na dissipação do calor da pastilha varistora.

A porcelana dá a rigidez mecânica externa, sustentação ao conjunto, e garante distância de escoamento através das aletas, também conhecidas como saias. A porcelana também garante a estanqueidade, o isolamento físico entre a coluna e o ambiente externo, protegendo o núcleo da poluição.

As quatro hastes de suporte prendem os varistores dentro da coluna, empilhados e verticalmente compreendidos entre as placas de suporte. São quatro hastes neste modelo, feitas de fibra de vidro reforçada e presas às placas de suporte por meio de presilhas. Cada extremidade da haste, após passar pela placa de suporte, recebe uma presilha para que não saia de posição.

Os varistores são a essência do pára-raios, representando toda a funcionalidade destes supressores de surto. A pastilha varistora do pára-raios de óxido de zinco é composta por uma combinação de óxidos. Aproximadamente 90% da massa da pastilha é óxido de zinco, e o restante são outros óxidos, tais como: alumínio, antimônio, bário, bismuto, cobalto, manganês, níquel, silício e titânio, sendo o bismuto e o antimônio os mais importantes componentes da mistura, responsáveis pela formação das barreiras físicas e elétricas adjacentes aos grãos de óxido de zinco que proporcionam ao material as suas características exclusivas. Nos pára-raios em geral, o diâmetro das pastilhas de óxido de zinco varia de 30 mm até cerca de 100 mm, e quanto maior o diâmetro maior a capacidade de absorção de energia. A altura varia de 20 mm a 45 mm, sendo dependente do sistema de fabricação. Quanto maior a altura e o diâmetro mais difícil é para se produzir uma pastilha homogênea. As pastilhas podem ser vistas na Figura 7. Para os modelos 3EP, as pastilhas têm um diâmetro de 75 mm e uma altura de 23 mm, pesando 550 g cada uma.

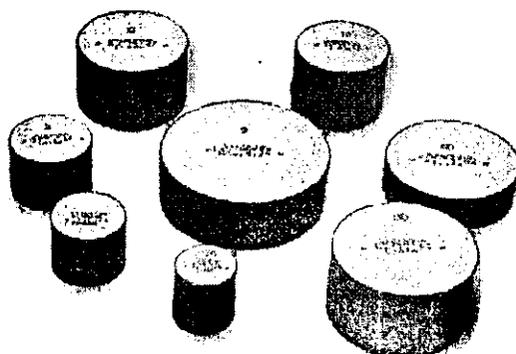


Figura 7. Fotografia de varistores de diferentes tamanhos.

intrínsecos mais interessantes do ponto de vista mecânico. Os sensores de temperatura por Redes de Bragg são exemplos de sensores intrínsecos. Há ainda a divisão dos sensores quanto ao tipo de efeito óptico, podendo ser uma alteração na intensidade, na polarização, no espectro ou na fase da onda luminosa.

Dentre as várias classes de sensores a fibra óptica intrínsecos, aqueles baseados em redes de Bragg hoje se destacam como uma excelente opção entre as demais tecnologias disponíveis.

4.1. Redes de Bragg em Fibras Ópticas

Desde o decênio de 1990 um novo componente óptico tem se tornando cada dia mais importante tanto para a indústria de telecomunicações quanto para aplicações na área de sensores. Este componente, chamado de rede de Bragg ou Grade de Bragg, nada mais é que um filtro óptico reflexivo com altíssima seletividade espectral. Sua construção se baseia em gerar uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra que reflete de forma eficiente o comprimento de onda λ_B que satisfaz a condição de Bragg em primeira ordem para incidência normal, ou seja:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

em que, Λ é período espacial da modulação do índice e n a índice de refração da fibra. A Figura 8 representa esquematicamente uma rede Bragg em fibra e os espectros da luz transmitida e refletida por ela.

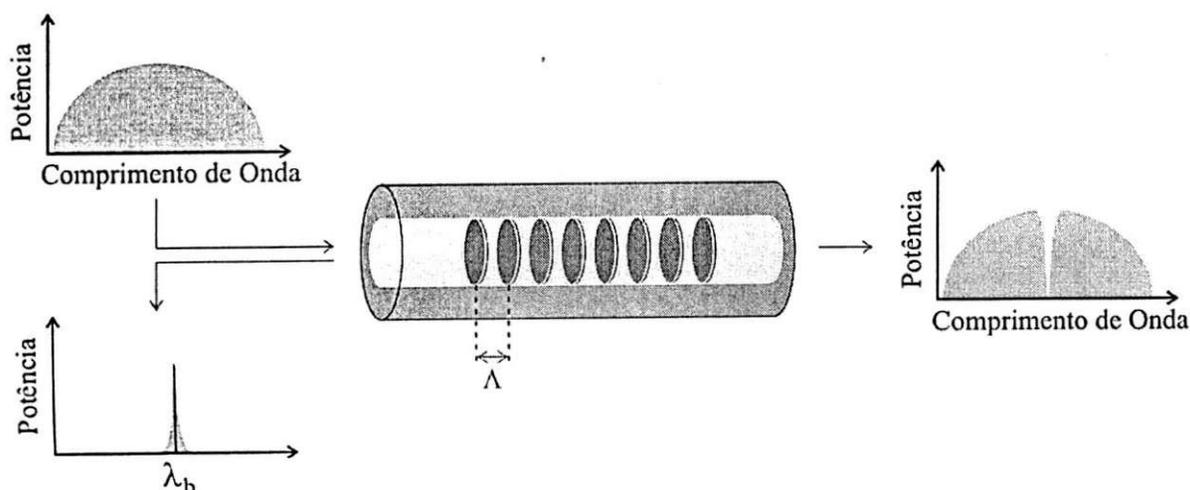


Figura 8. Rede de Bragg e os espectros de transmissão e reflexão.

A Figura 9 apresenta um espectro óptico típico refletido por uma rede de Bragg fabricada no Laboratório de Transdutores da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). É notável a seletividade do filtro, refletindo uma banda de apenas alguns nanômetros.

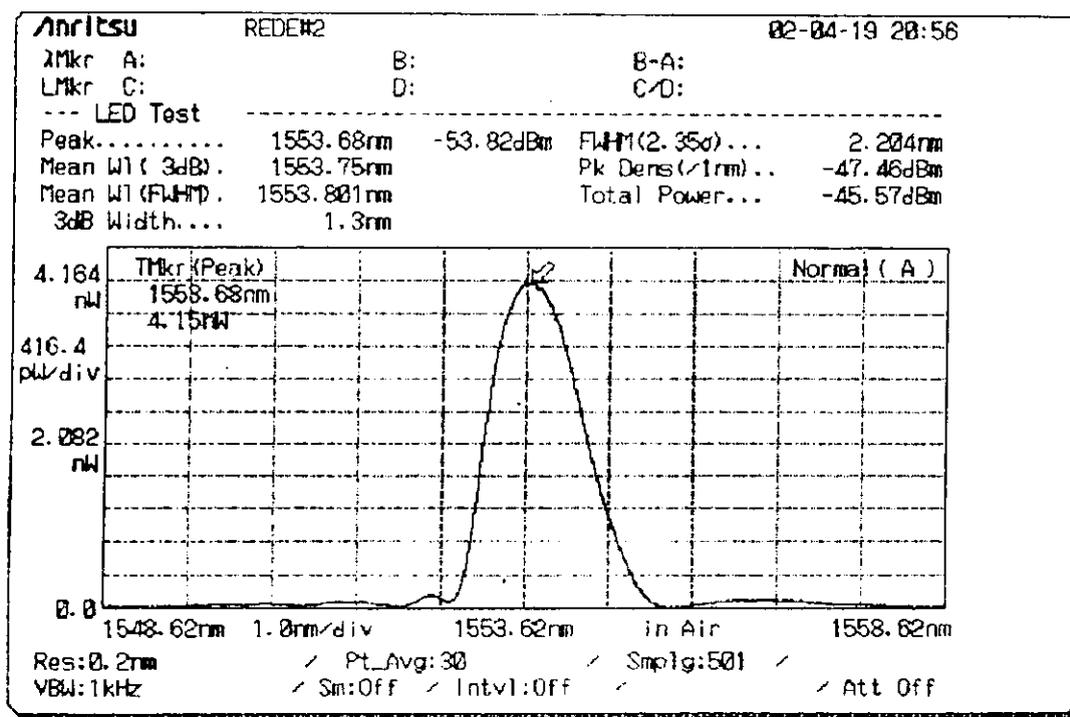


Figura 9. Espectro óptico típico por uma rede de Bragg.

A capacidade de sensoriamento de redes de Bragg está relacionada ao fato de que λ_B pode ser alterado por esforços mecânicos que modificam a periodicidade da estrutura, Λ , ou através de temperatura que modifica a índice de refração, n . Estas dependências podem ser resumidas, de forma linear aproximada, na expressão:

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = 9 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T + 0,78 \cdot \varepsilon \quad (2)$$

em que ΔT é a variação de temperatura em °C e ε representa a deformação em m/m. As constantes numéricas são características do material que compõe a fibra. A constante térmica pode apresentar variações entre fibras. A grande atratividade para o uso das redes de Bragg com sensores se deve ao fato da informação estar contida no espectro, o que significa uma medida absoluta e fácil de ser multiplexada. Resulta da equação (2) a verificação de que, para os comprimentos de onda comumente utilizados em telecomunicações (1300 e 1550 nm), a medida

de λ_B deve ser realizada com exatidão da ordem de 1 pm para que se possa medir 1 $\mu\text{m/m}$ de deformação ou 0,1 $^\circ\text{C}$ de temperatura. Embora esta possa parecer uma tarefa extremamente difícil, existem diversas formas de se alcançar este objetivo. A escolha do método não é óbvia e depende fundamentalmente da aplicação a que se destina, devendo-se em cada caso considerar as bandas de frequência envolvidas, o número de sensores interrogados, sua distribuição espacial, a faixa dinâmica de deformações ou temperaturas a serem medidas, limitações de espaço e peso do sistema de medição e, é claro, o custo.

4.1.1. Técnicas Baseadas em Fibras de Banda Ajustável

Neste contexto enquadra-se aquela que é, sem dúvida, a técnica mais simples, consistindo na leitura direta através de um Analisador de Espectro Óptico (OSA, do inglês Optical Spectrum Analyzer). O diagrama da Figura 10 ilustra a montagem do circuito óptico quando um OSA é empregado. Pode-se obter uma exatidão da ordem de 3 pm na leitura do espectro, correspondente a deformações próximas de 3 $\mu\text{m/m}$ ou variações de temperatura de 0,3 $^\circ\text{C}$.

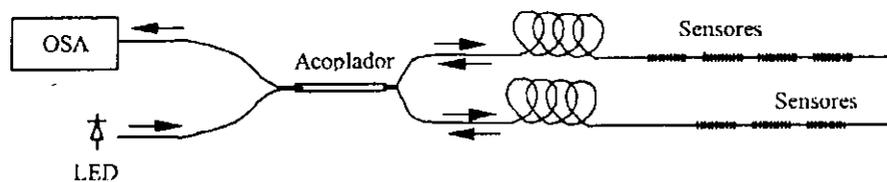


Figura 10. Circuito óptico para leitura com um Analisador de Espectro Óptico (OSA).

A faixa dinâmica na medida de deformações com OSAs comerciais é limitada de acordo com o número de sensores interrogados. Utilizando-se dois LEDs nos comprimentos de onda típicos de 1300 nm e 1550 nm, a relação entre a faixa dinâmica, $\Delta\epsilon$, e o número de sensores, N, pode ser estimada através da relação:

$$\Delta\epsilon = 10^5 / N \text{ (em pm/m)} \quad (3)$$

Assim, por exemplo, para a leitura de 100 sensores utilizando-se um OSA comercial, a faixa dinâmica estimada para cada ponto de medida é da ordem de 1 000 $\mu\text{m/m}$. A principal

vantagem no emprego de um OSA de uso geral e a simplicidade e rapidez na montagem do sistema de medidas. Deve-se pesar, entretanto, o custo elevado do equipamento e a lentidão com que a varredura do espectro óptico é realizada, tipicamente uma varredura por minuto numa faixa de 100 nm, o que praticamente limita sua utilização a medidas estáticas. Portanto, esta técnica deve ser considerada em situações onde as medidas não são realizadas continuamente, de forma que o equipamento possa ser também utilizado em outras aplicações, repartindo o seu custo elevado. No caso de se desejar medir um grande número de sensores em uma mesma fibra, esta alternativa pode se tornar economicamente atraente.

4.1.2. Técnicas Baseadas em Filtros Fixos

Uma alternativa de menor custo e empregar filtros espectrais fixos. Tais filtros podem ser do tipo Fabry-Perot, interferômetro de Mach-Zehnder, ou mesmo uma rede de Bragg. Esta tem sido a solução aplicada na maioria dos projetos ora em desenvolvimento na PUC-Rio, e é um destes que constitui o equipamento utilizado nos ensaios. A Figura 11 apresenta circuitos ópticos baseados nesta técnica.

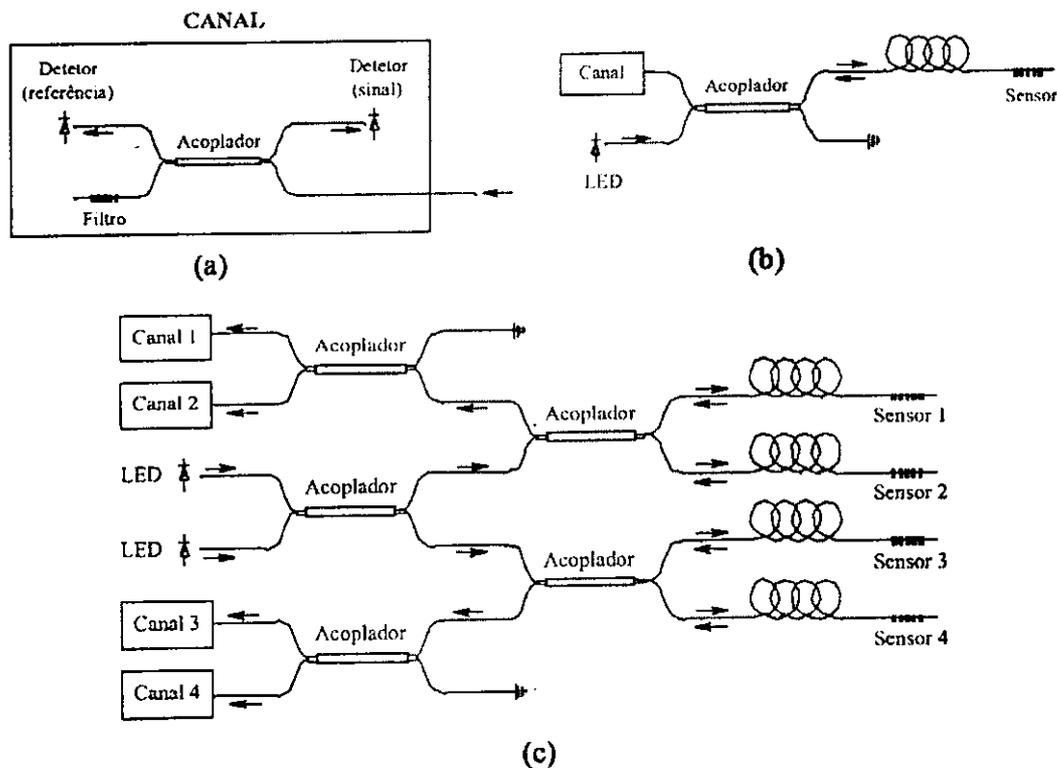


Figura 11. Circuitos ópticos utilizando redes de Bragg como filtros de banda passante fixa: (a) Canal de leitura; (b) Circuito para um sensor; (c) Circuito para quatro sensores em fibras diferentes.

O sistema emprega fontes de banda larga e o sinal refletido pela rede utilizada como sensor é dirigido, através de um acoplador de 3 dB, para o filtro e para um detetor de referência. O sinal óptico resultante da interação com o filtro é então guiado para o outro detetor, e sua saída elétrica é dividida pela obtida a partir do detetor de referência. A utilização de um sinal de referência tem por objetivo compensar flutuações na fonte óptica. Este procedimento permite que o sinal de leitura se mantenha estável, com uma variação inferior a +1,5% enquanto a potência entregue pelo LED é reduzida em até 50%.

A principal vantagem na utilização de filtros espectrais fixos é a possibilidade de aplicação em medidas dinâmicas de poucos sensores. A faixa de frequência é limitada pela resposta dos fotodetetores e dos circuitos eletrônicos de amplificação utilizados, podendo sem dificuldade chegar a algumas centenas de quilohertz. Por outro lado, esta técnica impõe restrições sobre a faixa dinâmica de leitura. Uma alternativa para ampliar esta faixa é utilizar dois filtros ópticos.

4.2. O Equipamento Utilizado nos Ensaios: OIS-106

Após se considerar as necessidades de medição e as tecnologias disponíveis no mercado, o sensoriamento óptico mostrou-se a solução mais interessante. Contudo, há uma carência de fornecedores deste tipo de equipamento, dado que é uma tecnologia bastante recente e, apesar de muito pesquisada, pouco aparente no mercado atual. Foi feita, então, uma pesquisa de mercado para se determinar os fabricantes do termômetro em questão.

No Brasil, a empresa pioneira nessa área e única com equipamento completamente desenvolvido para venda é a Gávea Sensors. Associada à Incubadora de Empresas da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, desenvolve sensores e sistemas de medição de pressão, temperatura, dentre outras grandezas físicas. O produto da Gávea Sensors foi escolhido devido à proximidade geográfica e a grande disposição da empresa no desenvolvimento do aparelho, que foi construído de acordo com a necessidade dos ensaios em que seria utilizado, na UFCG.

Confirmado o fabricante que forneceria o termômetro, deu-se início a fase de detalhamento das qualidades desejadas ao sistema. Via Internet e telefone, vários aspectos importantes e cabíveis ao sistema de medição foram exaustivamente discutidos e por fim

especificados. São exemplos: nível máximo de tensão suportável, temperatura máxima suportável e forma de transmissão de dados.

Foi então finalizada a construção do módulo de leitura, digitalização e interface, rigorosamente dentro das especificações detalhadas via e-mail e telefone. Nos dias 10 e 11 de novembro de 2004 os engenheiros Eduardo Costa e Luiz Guedes, da Gávea Sensors, vieram até o Laboratório de Alta Tensão da UFCG para apresentação do equipamento, treinamento de pessoal e verificação de detalhes finais, mas não menos importantes. Foram eles:

- **Método de fixação dos sensores nos pontos de medida de temperatura nos pára-raios.**

Em ensaios com tensões aplicadas menores que 69 kV, eram utilizados termômetros eletrônicos baseados em termopares. A fixação dos termopares nos varistores, espaçadores e porcelana que constituem o pára-raios era feita com cola a base de epóxi e quando o ensaio era finalizado, a cola e os termopares eram removidos do pára-raios ainda juntos, com a ajuda de um alicate, e em seguida a cola era cuidadosamente retirada dos termopares. Ocasionalmente, um termopar se danificava neste processo, mas se podia remediar o problema cortando-se a parte danificada do cabo dos termômetros e fundindo-se novamente os dois fios que constituem o sensor, na ponta. Desta forma, obtinha-se um novo termopar.

Todavia, os sensores ópticos não podem ser expostos a tal tipo de esforço físico, muito menos se pode obter um novo sensor a partir de um cabo danificado sem a ajuda de todo um laboratório especializado. A fixação com cola epóxi estava, portanto, descartada. Outros tipos de colas e resinas menos resistentes mecanicamente e que facilitariam a remoção dos sensores também são pouco resistentes à temperatura, e derreteriam durante o ensaio, comprometendo a fixação dos sensores e invalidando o ensaio. A opção adotada foi fixar os sensores das fibras nos varistores e espaçadores com a ajuda de presilhas que contornariam todo o perímetro do varistor ou espaçador, abraçando o sensor da fibra, neste trajeto. Esse método foi beneficiado pela geometria cilíndrica dos varistores e espaçadores. Uma ilustração do método de fixação pode ser visto na Figura 12. A ponta da presilha aparece na ilustração para proporcionar melhor entendimento. Ela foi cortada rente à trava da presilha para evitar maior concentração de campo elétrico.

- **Escolha de encapsulamento adequados.** Como o local de aplicação dos sensores requeria que eles suportassem altas temperaturas e esforços mecânicos, assim, optou-se pelo encapsulamento mais robusto disponível. Trata-se de uma pequena peça de vidro, semelhante

a um tubo de ensaio em miniatura, onde a ponta da fibra é abrigada e depois lacrada com plástico fundido. Tal invólucro pode ser visto no detalhe da Figura 15.

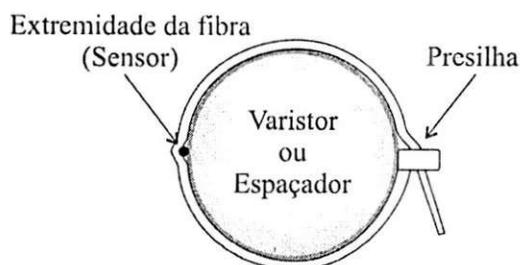


Figura 12. Vista superior de varistor com o sensor de temperatura fixado com presilha de nylon.

- **Tipo de casca a se usar nas fibras.** O tipo de casca escolhido para a fibra foi decidido com base nas temperaturas a que tal casca seria exposta e do diâmetro máximo que todo o conjunto, fibra e casca, poderiam ter. Para a faixa entre 20°C e 250°C, temperaturas extremas que podem ocorrer num ensaio do tipo, e com um diâmetro de menos de cinco milímetros, escolheu-se uma casca plástica resistente a estas temperaturas, mostrada na Figura 15.

Definidos os parâmetros, foram realizados alguns experimentos a título de teste, para garantir a familiarização do pessoal que opera o sistema, tanto na parte de software como hardware. Também foi ministrada uma palestra de apresentação da Gávea Sensors, aberta a toda a comunidade universitária.

Um mês após a visita, foi enviada ao Laboratório de Alta Tensão a versão final do sistema, com fibras dotadas de cascas e encapsulamentos adequados à aplicação em pára-raios, módulo de leitura, digitalização e interface calibrado para tais fibras, e as extensões ópticas.

O sistema adquirido dispõe de:

- Módulo de leitura, digitalização e interface com o PC, Figuras 13 e 14;

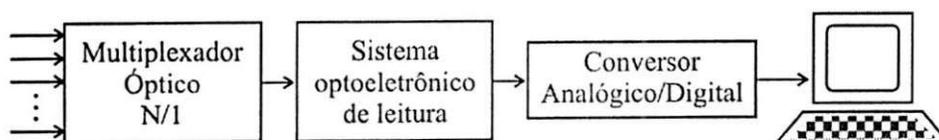


Figura 13: Diagrama de blocos do sistema de leitura, digitalização e interface.

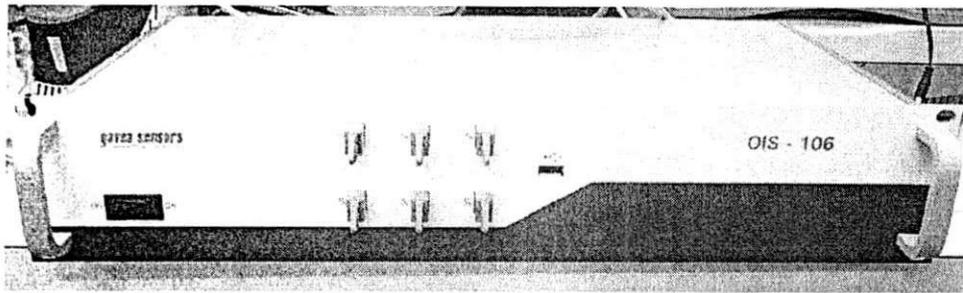


Figura 14. Vista frontal do módulo de leitura, digitalização e interface (sistema de leitura).

- Seis cordões de fibras ópticas, cada um com um sensor em sua extremidade. Um deles é mostrado na Figura 15;

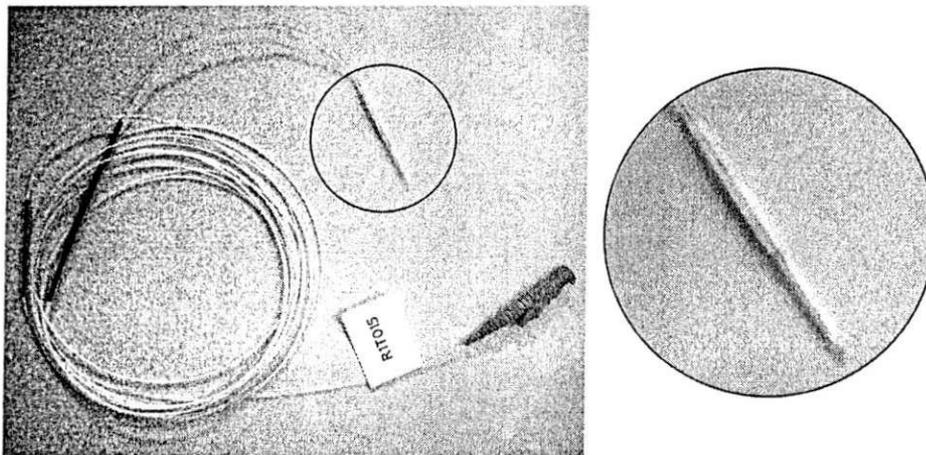


Figura 15. Uma das Fibras ópticas; destaque no sensor encapsulado.

- Seis extensões ópticas para aumentar-se a distância entre o módulo de leitura e o equipamento a ser ensaiado, onde está aplicada alta tensão. Uma delas é mostrada na Figura 16.

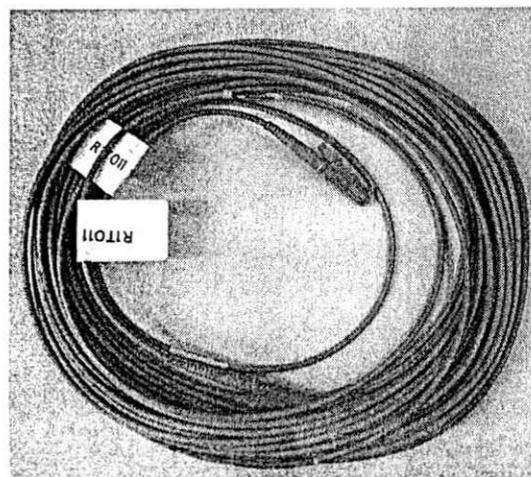


Figura 16. Uma das extensões óptica.

- Seis conectores para ligação entre fibras e extensões, além de CD de instalação, cabo de força e cabo de interface USB.

4.3. Ensaios Preliminares e de Aferição

Com o sistema definitivo e sem a presença dos engenheiros da Gávea, aconteceram contratempos relativos à compatibilidade do software fornecido pela Gávea Sensors e o Sistema Operacional Windows XP em português, utilizado no laboratório. Apesar de estar dentro das especificações técnicas solicitadas, o software não apresentava valores numéricos para as medidas. Depois de serem verificadas várias vezes as conexões de cabos, processos de instalação de software, alimentação e todas as outras possibilidades de falha remotamente solucionáveis, o que custou três dias de longos telefonemas, verificou-se que, na verdade, o problema resumia-se ao sinalizador de decimal utilizado em cada um dos dois softwares: enquanto o Sistema de Medição da Gávea Sensors, mostrado na Figura 17, utiliza-se do ponto “.” para separar um número inteiro de sua parte decimal, o Sistema Operacional Windows XP utiliza um vírgula “,”, conforme o padrão brasileiro.

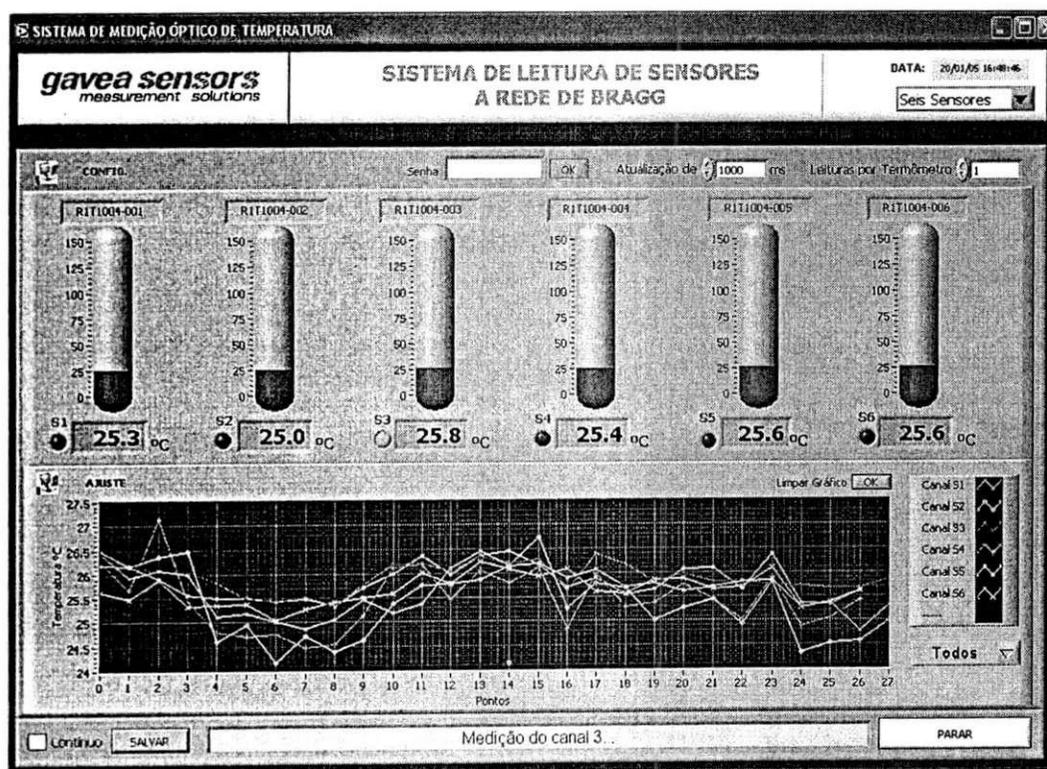


Figura 17. Janela principal do software de medição de temperatura.

Esta sutil diferença não permitia que o Sistema de Medição da Gávea Sensors exibisse os resultados de forma adequada, gerando resultados não-numéricos, pois o software considera a vírgula um caractere não-numérico.

Apesar de ser um problema facilmente contornável, antes de se descobrir que a incompatibilidade de sinalizadores decimais era o causador do mau funcionamento, todas as outras hipóteses de problemas de hardware e software foram testadas e extintas. Durante as tentativas de solução dos resultados não numéricos, foi adquirido um conhecimento bem mais profundo sobre o funcionamento do sistema de medição de temperatura como um todo, e sobre seu funcionamento. Todo o suporte necessário para a correção do problema foi dado por telefone, pelo engenheiro Rogério Regazzi, da Gávea Sensors.

Com o funcionamento pleno o equipamento, iniciou-se uma série de ensaios preliminares para ajustes de offset e verificação de coerência.

4.3.1. Ajuste de Offset

Os ajustes de offset são necessários para garantir uma medição coerente e verídica das temperaturas que se apresentarão em ensaios futuros. Cada sensor (fibra) tem uma curva característica exclusiva de reação às mudanças de temperatura. Estas curvas, aproximadas por polinômios de terceiro grau, foram levantadas na PUC-RIO, mas devem ter seu nível (offset) ajustado de acordo com a temperatura ambiente, a cada uso do sistema. Na Figura 8 pode-se observar o ensaio para ajuste de offset. Com este ajuste, garante-se que todas as fibras medirão os mesmos valores iniciais de temperatura, partindo do mesmo ponto em cada uma das suas curvas características.

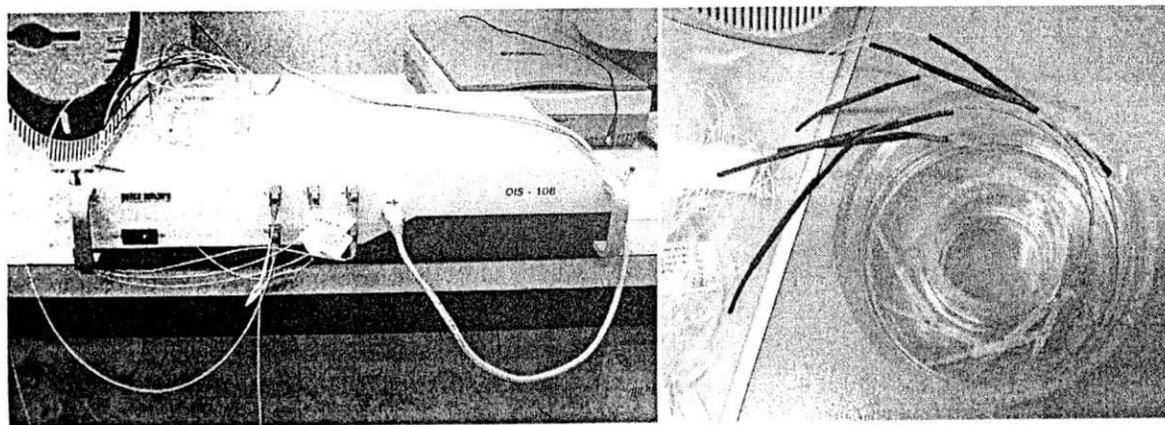


Figura 18. Montagem para o ajuste de offset.

Para a realização deste ensaio todos os sensores devem ser colocados num ambiente com temperatura conhecida e estável. Na ocasião ilustrada pela Figura 18, utilizou-se um banho. A partir da leitura desta temperatura conhecida via um termômetro de mercúrio usado como referência, entra-se no software o valor de offset, comum para todas as fibras. Neste ensaio em particular, a temperatura do banho era de 26,4°C.

4.3.2. Teste de coerência

Para aferir a calibração do equipamento feita na PUC-RIO, foi realizado um ensaio de coerência entre os seis sensores do sistema. Com este teste pode-se verificar se todos os sensores respondiam igualmente a variações de temperatura, comprovando que as curvas características a eles atribuídas, apesar de únicas exclusivas para cada fibra, são suficientemente semelhantes a ponto de que mesmo com variações grandes de temperatura, todos meçam valores suficientemente próximos.

A realização deste ensaio (após o ajuste de offset) deu-se com a imersão dos sensores em um banho, e a variação da temperatura deste banho de forma gradativa, conforme acontecerá nos ensaios com os pára-raios. A temperatura do banho era inicialmente 26°C, foi elevada até 85°C, e depois se permitiu o resfriamento do conjunto. A montagem é mostrada na Figura 19.

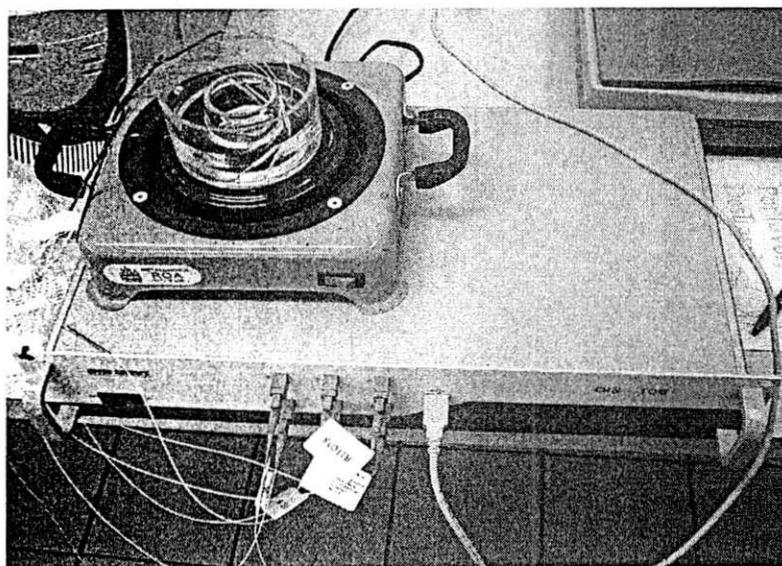


Figura 19. Montagem para o teste de coerência.

O resultado do ensaio foi bastante coerente, mostrando que as fibras mantiveram a convergência em torno da temperatura média aplicada, enquanto esta temperatura variava.

5. MONTAGEM DO ENSAIO COM O PÁRA-RAIOS

A montagem do ensaio de validação de temperatura durou aproximadamente dez horas. Isto se deveu principalmente ao processo de desmontagem e remontagem do pára-raios, que envolvem derretimento do cimento a base de enxofre. Além disso, cada coluna de pára-raios pesa 100 kg, o que requer o uso de carrinhos para auxiliar no transporte e pelo menos duas pessoas para entorná-lo sem grandes impactos.

A montagem dos circuitos de aquisição de dados, anulação da corrente capacitiva e demais detalhes elétricos também requerem algum tempo, e raramente funcionam a contento na primeira tentativa de montagem, requerendo ajustes.

5.1. Abertura do Pára-raios e Fixação dos Sensores Ópticos

O pára-raios foi inicialmente aberto, procedendo-se o derretimento do cimento que fazia sua vedação com a ajuda de um maçarico. Para isto, o pára-raios é posicionado na horizontal e o flange do lado terra é aquecido até que o enxofre do cimento derreta, soltando o flange da porcelana. Com o flange do lado terra solto, pôde-se retirar o núcleo do pára raios.

Como está com o lado terra aberto, depois de esfriar, o pára-raios é posto na vertical com o flange do lado fase sobre o chão, e com a extremidade terra, voltada para cima. Este posicionamento implica que a montagem posterior deve ser feita com o equipamento de cabeça para baixo. Na Figura 20 é mostrado o núcleo do pára-raios. Pode-se perceber que ele está de cabeça para baixo pela presença dos absorvedores na sua parte inferior.

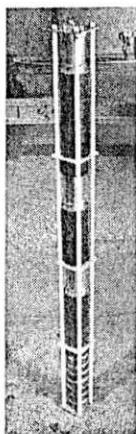


Figura 20. Coluna do pára-raios ensaiado.

A porcelana do pára-raios tinha sido furada com uma broca especial, na altura média do equipamento. Por orifícios de quatro milímetros de diâmetro foram passados os sensores, sendo três deles por um orifício, e outros dois pelo outro, diametralmente oposto, como pode ser visto na Figura 21.

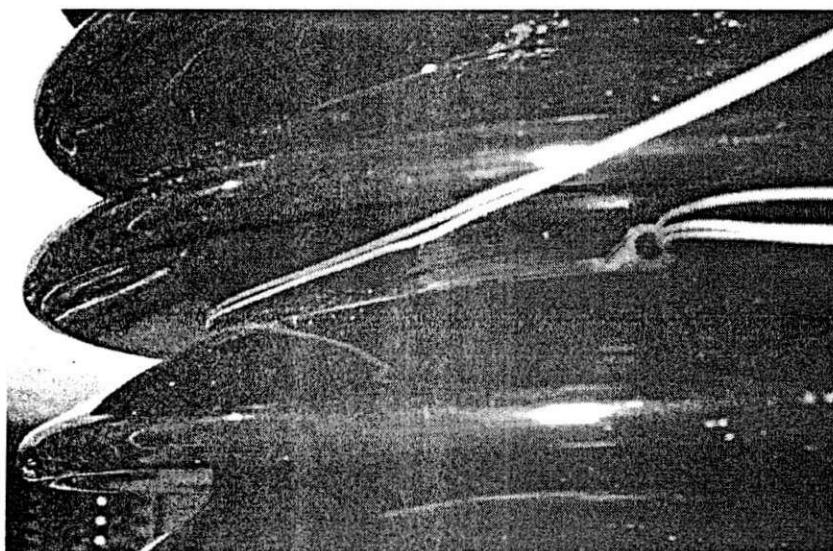


Figura 21. Fibras passando por um dos orifícios da porcelana.

Cada uma das cinco fibras foi puxada para fora do invólucro de porcelana pelo orifício do lado terra, como visto na Figura 22.

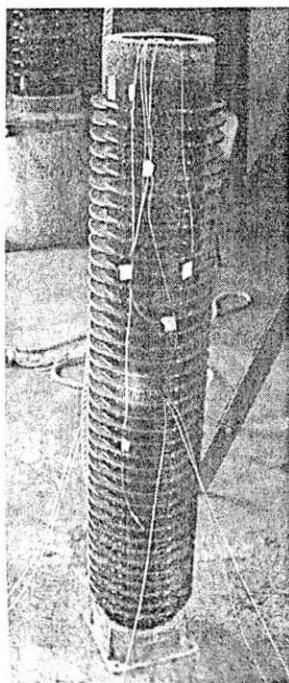


Figura 22. Sensores puxados pelo orifício do lado terra.

A coluna foi então presa à ponta de uma das talhas do laboratório e içada até uma altura maior que a do invólucro de porcelana. Os sensores foram então fixados nos pontos de interesse da coluna, com a ajuda das presilhas de náilon. A Figura 23 mostra estes pontos de medição no corte esquemático do pára-raios.

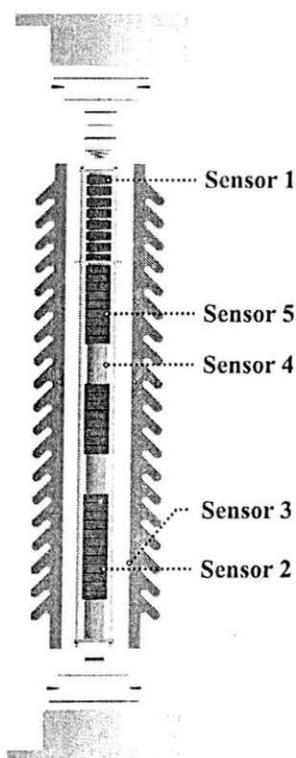


Figura 23. Pontos de medição de temperatura no pára-raios.

Enumeraram-se os varistores da coluna de cima para baixo e, da mesma forma, enumeraram-se os espaçadores. Observa-se na Figura 23 que foram fixados sensores nos varistores 1, 14, 34 e no espaçador 2. A disposição dos sensores procura passar uma noção dos vários valores de temperatura em toda a extensão da coluna, bem como medir temperaturas em materiais diferentes para se obter curvas diferentes e se validar o modelo eletrotérmico computacional. A Tabela 1 mostra a disposição dos sensores no pára-raios e a forma de fixação de cada um deles.

Tabela 1. Disposição dos varistores no pára-raios 3EP.

Número do Sensor	Local de aplicação	Forma de Fixação
Sensor 1	Varistor 1	Presilha de nylon
Sensor 2	Varistor 34	Presilha de nylon
Sensor 3	Porcelana, interno	Cola de silicone
Sensor 4	Espaçador 2	Presilha de nylon
Sensor 5	Varistor 14	Presilha de nylon

Os sensores 2 e 3 foram colocados em alturas muito próximas no intuito de registrarem a propagação radial de calor pelo a partir do varistor 34, através do colchão de ar, até a porcelana, naquela altura. A Figura 24 mostra uma fotografia da fixação do Sensor 2 no varistor 34. Para garantir uma boa condutividade térmica entre os pontos de fixação e os sensores 1, 2 3 e 4, aplicou-se pasta térmica na interface.

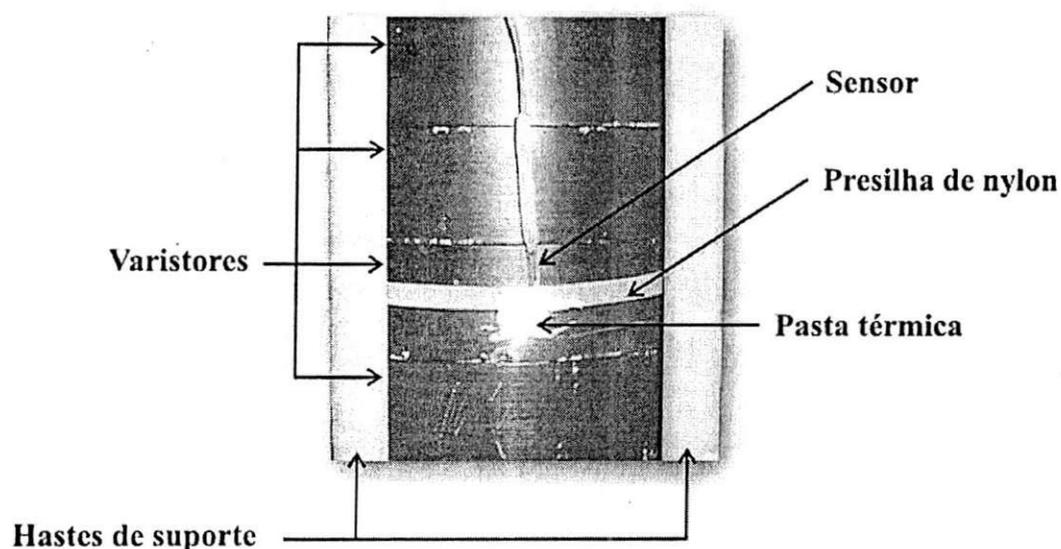
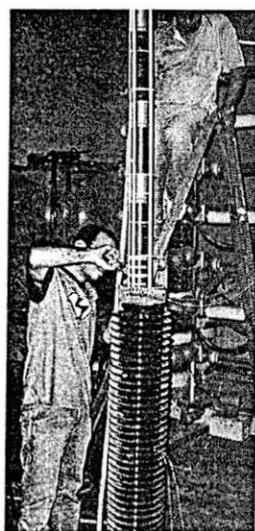


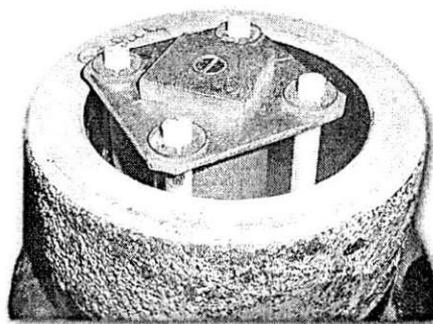
Figura 24. Fixação do Sensor 2 no varistor 34.

O último sensor, colocado na porcelana, foi fixado com cola de silicone. Como a porcelana não fica exposta a temperaturas tão elevadas quanto os varistores e espaçadores, não foi necessário fixar o sensor com métodos mais resistentes ao calor. Desta forma a pasta térmica foi dispensada, pois a condutividade térmica deu-se através da cola. Contudo, como o ambiente interno da porcelana fica exposto a campos elétricos bastante intensos durante a operação do pára-raios, foi tomado cuidado para que não restassem pontas na superfície da cola.

Depois de fixados os sensores nos varistores, espaçador e porcelana do pára-raios, a coluna foi cuidadosa e lentamente abaixada para dentro do invólucro de porcelana. A Figura 25(a) ilustra este processo. Conforme descia a coluna, as fibras ópticas dos sensores foram delicadamente puxadas para fora do invólucro pelos orifícios de cinco milímetros que entraram. Desta forma, garante-se que não haverá excesso de fibras dentro do invólucro, permanecendo dentro do pára-raios a menor extensão de fibra possível, ou seja, cada fibra deve partir do ponto onde está aplicado o sensor ao orifício lateral de saída com a menor extensão linear possível. Na Figura 25(b) observa-se a coluna completamente inserida no invólucro.



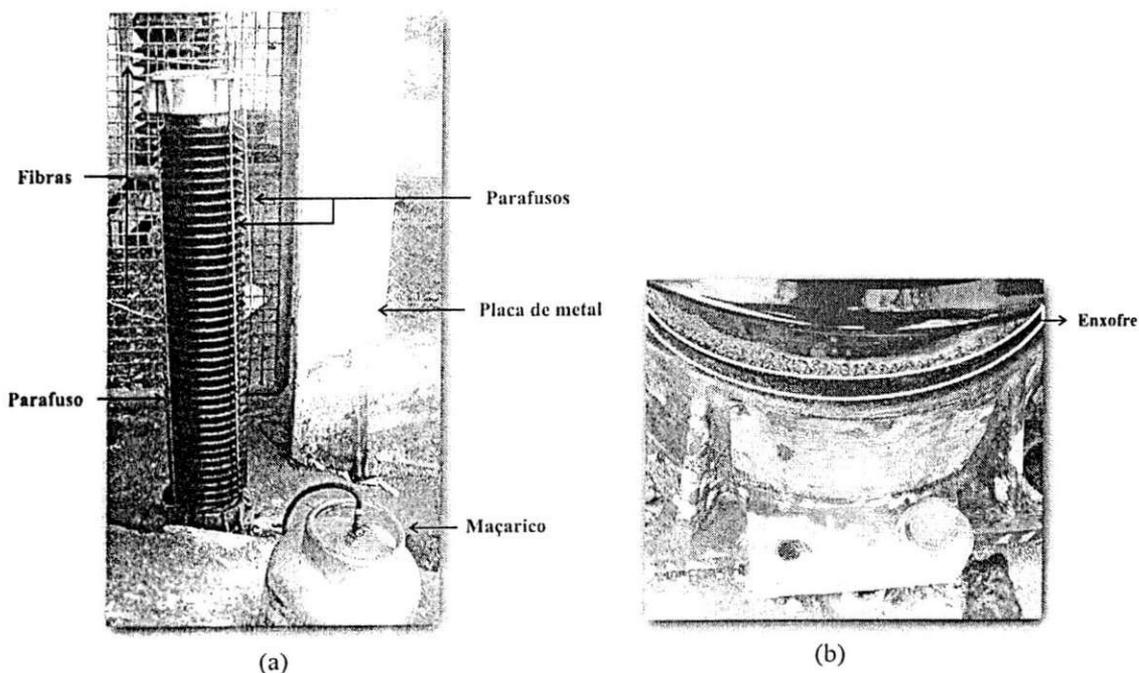
(a)



(b)

Figura 25. Processo de inserção da coluna no invólucro do pára-raios.

Uma vez recolocada a coluna no invólucro de porcelana, procedeu-se o fechamento do pára-raios. O flange terra, juntamente com o diafragma, borracha de vedação e o disco de suporte foram colocados sobre a porcelana e parafusos foram usados para dar a pressão necessária entre o flange e a porcelana, garantindo a vedação. A Figura 26(a) mostra os parafusos aplicados ao equipamento. O pára-raios foi então posicionado na vertical, desta vez com o lado terra no solo, e com a ajuda de um maçarico, o flange terra foi aquecido. Em seguida, enxofre em pó foi derretido sobre uma placa de metal, de forma que escorresse para o pequeno vão entre a porcelana e o flange terra, preenchendo os espaços. Na Figura 26(b) pode-se ver o preenchimento de enxofre na entre a porcelana e o flange terra.



(a)

(b)

Figura 26. Processo de fechamento do pára-raios.

Vedado o pára-raios com enxofre, aguardou-se o seu resfriamento e depois ele foi conduzido para o local de ensaios, para se realizarem as conexões elétricas.

5.2. Circuitos Elétricos e de Medição de Temperatura

Uma vez que o pára-raios estava completamente montado, com os sensores implantados e posicionado no local do ensaio, procedeu-se a montagem do circuito de alimentação, circuitos de medição e aquisição de dados e do circuito óptico de medição de temperatura.

5.2.1. Circuitos de alimentação, medição e aquisição de dados

O pára-raios foi posicionado sobre uma mesa de madeira, acima de uma placa de plástico isolante, visando mitigar correntes de fuga diretamente para a terra. Ao seu flange fase foi ligado um condutor de para alimentação de alta tensão. Contudo, a realização do ensaio requer alguns cuidados adicionais.

A corrente de fuga que flui pelo pára-raios apresenta duas componentes: capacitiva e resistiva. Para se obter uma representação fiel da corrente de fuga resistiva, componente da corrente que efetivamente contribui para o aquecimento do equipamento, é necessário inicialmente separar as componentes capacitiva e resistiva que compõem a corrente de fuga total do pára-raios. Devido à impossibilidade de se medir isoladamente apenas a componente resistiva da corrente de fuga, faz-se necessária a implementação de um circuito para obtenção da componente resistiva. Na Figura 27 é mostrado o diagrama elétrico correspondente ao circuito montado.

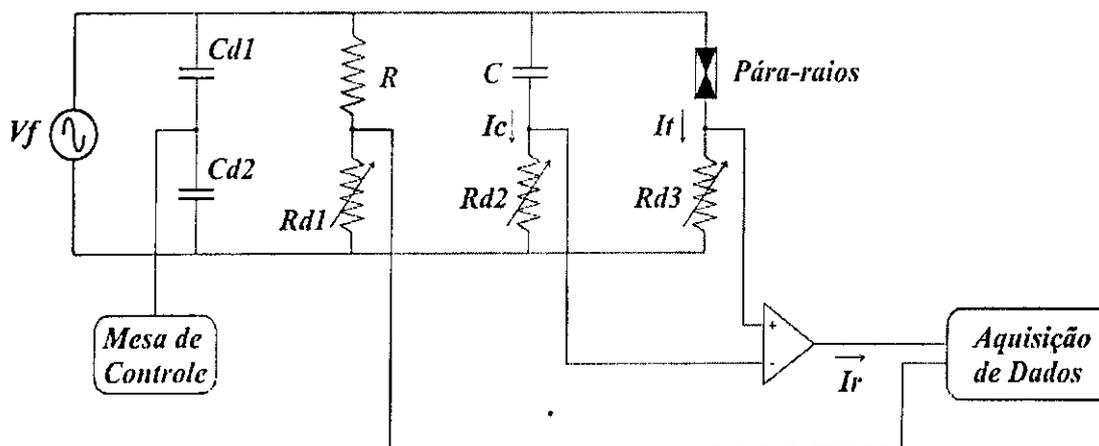


Figura 27. Diagrama elétrico do circuito experimental.

Os capacitores $Cd1$ (400 pF) e $Cd2$ (1,563 μF) formam um divisor capacitivo que fornece à mesa de controle o valor de tensão aplicada. R (280 $\text{M}\Omega$) e $Rd1$ (100 $\text{k}\Omega$) compõem um divisor resistivo que permite a obtenção da forma de onda da tensão aplicada ao pára-raios diretamente no osciloscópio.

A componente capacitiva da corrente pode ser cancelada amplificando diferencialmente I_t e a corrente que flui pelo capacitor C (1200 pF), I_c . Assim, removendo I_c de I_t , tem-se somente a componente resistiva (I_r) da corrente. Utilizando-se um capacitor C de alta tensão visando a compensação, de modo que $1/\omega C \gg R_{d2}$, a corrente resistiva no ramo do capacitor pode ser desprezada. O capacitor de compensação C deve apresentar baixa tangente de perdas. Para prover a anulação da corrente capacitiva, os valores de R_{d2} e R_{d3} devem ser ajustados de forma que a tensão aplicada e a suposta corrente resistiva apresentem defasagem nula. Quando a defasagem nula for atingida, a corrente na saída do amplificador diferencial é, de fato, resistiva. Para o ensaio em questão, os valores dos componentes R_{d2} e R_{d3} foram 2 570 Ω e 5 720 Ω , respectivamente. A Figura 28 mostra uma foto da montagem experimental.

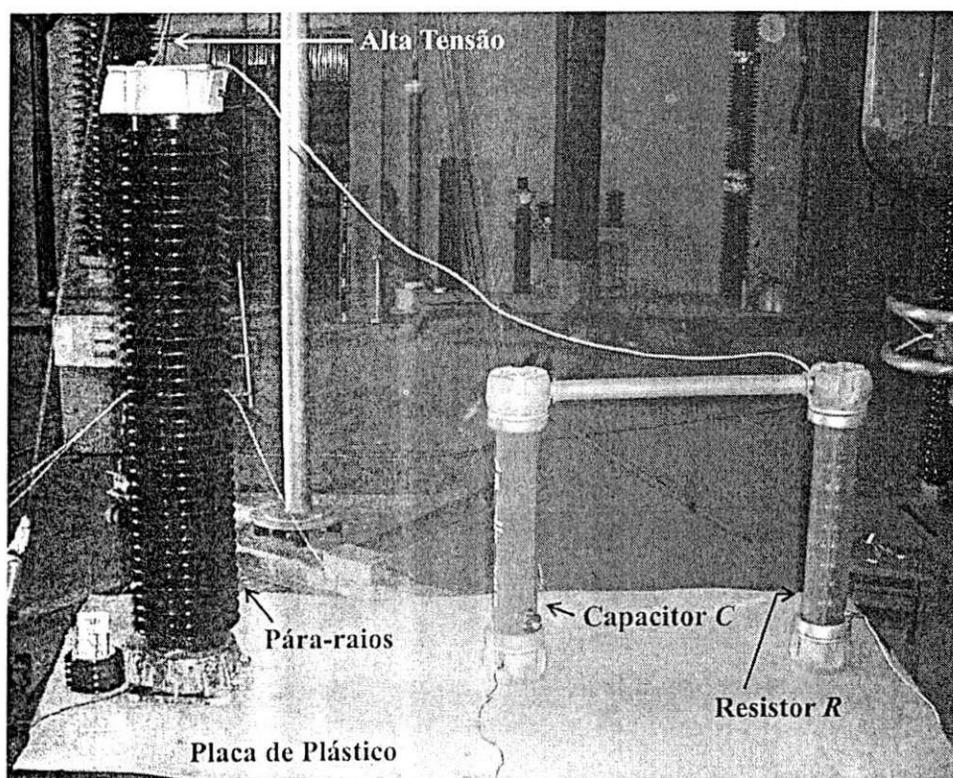


Figura 28. Montagem experimental.

Os componentes R_{d1} , R_{d2} e R_{d3} são resistores variáveis de década, e foram montados numa bancada externa à região de aplicação de alta tensão do laboratório. O sistema de aquisição de dados foi composto de um módulo digitalizador National Instruments

DACard 6062E, ligado a um laptop através de uma conexão PCMCIA. Além disso, foi ligado um osciloscópio digital Tektronix TDS-2014 para auxiliar na visualização das formas de onda dos sinais, e para realizar a amplificação diferencial necessária ao cancelamento da corrente capacitiva.

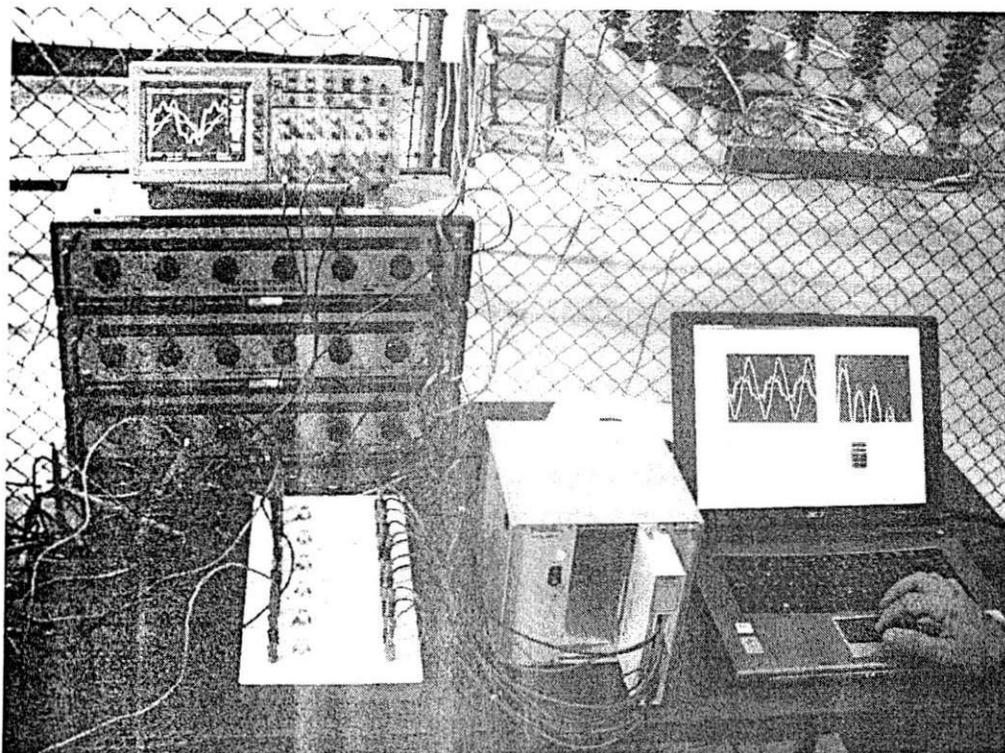


Figura 29. Bancada de aquisição de dados.

5.2.2. Circuito óptico de medição de temperatura

Estando os sensores fixados nos pontos de medição, as fibras foram esticadas em toda sua extensão e ligadas às suas respectivas extensões. Como cada sensor tem uma curva característica temperatura *versus* espectro refletido diferente, o sistema de leitura deve ter cada entrada calibrada exclusivamente para o uso de um sensor. Desta forma, os sensores são enumerados e só podem ser usados nas suas respectivas entradas, com suas respectivas extensões ópticas, pois a troca das extensões entre sensores também muda o índice de refração do conjunto e fatalmente ocasiona erros de medição.

Um cuidado importante é não tracionar ou vincar as fibras, pois o silício que as compõe tem estrutura delicada e pode vir a se romper, inutilizando o sensor. Desta forma, são admitidas curvaturas máximas nas fibras da ordem de dois centímetros de raio, para que estas

permaneçam intactas e funcionais. Esta curvatura mínima refere-se ao acondicionamento para guardar as fibras e também durante o manejo para as montagens. No momento das medições, as curvaturas devem ser as menores possíveis, com um metro de raio, no mínimo. As extensões ópticas e fibras que abrigam os sensores em suas pontas devem estar completamente desenroladas e estiradas, realizando curvas suaves e de grande raio, enquanto cumprem o trajeto que vai dos sensores ao módulo de medição. Sob hipótese alguma, nem as fibras ou as extensões devem ficar enroladas ou realizando micro-curvaturas. Estas precauções garantem que as fibras continuarão funcionais e que as medidas serão confiáveis, pois não haverá nenhuma curvatura pequena o suficiente para mudar o índice de refração da fibra e mascarar resultados.

Depois de estender as extensões, e ligá-las aos sensores e ao módulo de leitura, foram realizadas medições preliminares que mostraram o canal 3 com valores de temperatura notavelmente maiores que os demais, o que gerou suspeitas de medições errôneas, já que o pára-raios estava completamente à temperatura ambiente.

Uma inspeção mais detalhista das extensões e fibras sensoras mostrou uma curvatura acentuada na fibra do canal díspar. Apesar de nenhuma das fibras ou extensões ter curvatura acentuada no plano horizontal, a fibra do canal 3 tinha uma curvatura de aproximadamente 3 cm de raio no plano vertical, quando descia da mesa sobre a qual o pára-raios estava montado, rumo ao solo. Para contornar este problema, foram colocados apoios isolados na altura média entre a mesa e o solo, reduzindo assim a inclinação de descida das fibras rumo ao chão. Este problema ilustra de forma exemplar que, quando à procura de curvaturas nas fibras, deve-se pensar de forma tridimensional. O rearranjo das extensões foi suficiente para corrigir o problema e todas as medições dos cinco canais mostraram coerência.

6. EXECUÇÃO DO ENSAIO E RESULTADOS OBTIDOS

Às 10:25 da manhã, o OIS-106 começou a registrar os valores de temperatura de cada sensor. Foi aplicada alta tensão ao arranjo, às 10:30 da manhã. Ajustaram-se os resistores variáveis de década, para se garantir a anulação da corrente capacitiva no circuito. Uma forma prática de se conferir a anulação desta corrente é buscar a defasagem nula entre o sinal de tensão aplicado e a corrente total no circuito. Na Figura 30 é mostrada a tela do osciloscópio quando da defasagem nula.

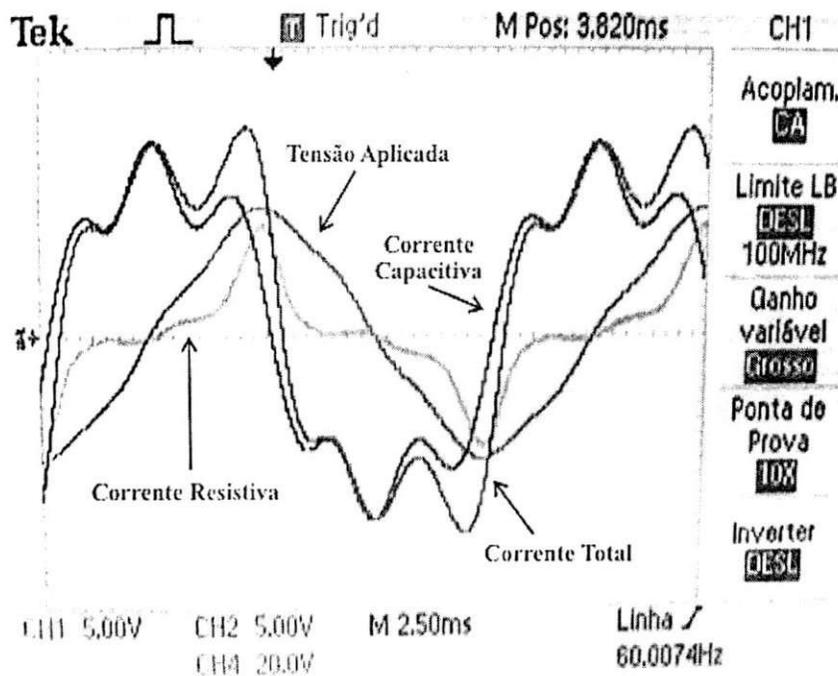


Figura 30. Tensão aplicada e corrente total em fase.

Como as ondas não são senoidais, tendo forte incidência de terceiro e quinto harmônicos, a aferição se faz pelo momento da passagem por zero de cada onda, e não pelo pico. As formas de onda mostradas na Figura 30 indicadas como Corrente Total e Corrente Capacitiva são aplicadas ao osciloscópio e, fazendo-se uso do recurso de subtração entre canais, obtém-se a corrente resistiva.

A tensão inicial foi de $74,22 \text{ kV}/\sqrt{2}$, sofrendo variações propositais durante o ensaio. Com as variações de tensão, ocorreram variações de corrente e de potência resistiva no equipamento. As variações são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Variações de grandezas elétricas durante o ensaio.

Horário da Aplicação	Tensão (kV/ $\sqrt{2}$)	Corrente (A)	Potência Resistiva (W)
10:30	74,224	1,482	48,459
10:35	75,046	1,473	48,507
10:40	73,886	1,500	49,160
10:45	73,354	1,476	48,629
10:50	74,176	1,461	48,427
10:55	73,789	1,473	48,635
11:00	83,847	4,651	150,023
11:05	84,137	4,835	154,367
11:10	85,104	4,974	160,757
11:15	84,959	5,511	176,159
11:20	85,539	5,608	180,593
11:25	84,282	5,448	175,815
11:30	85,201	5,870	189,860
11:35	84,089	6,091	197,954

A evolução das grandezas é mostrada de forma gráfica na Figura 31.

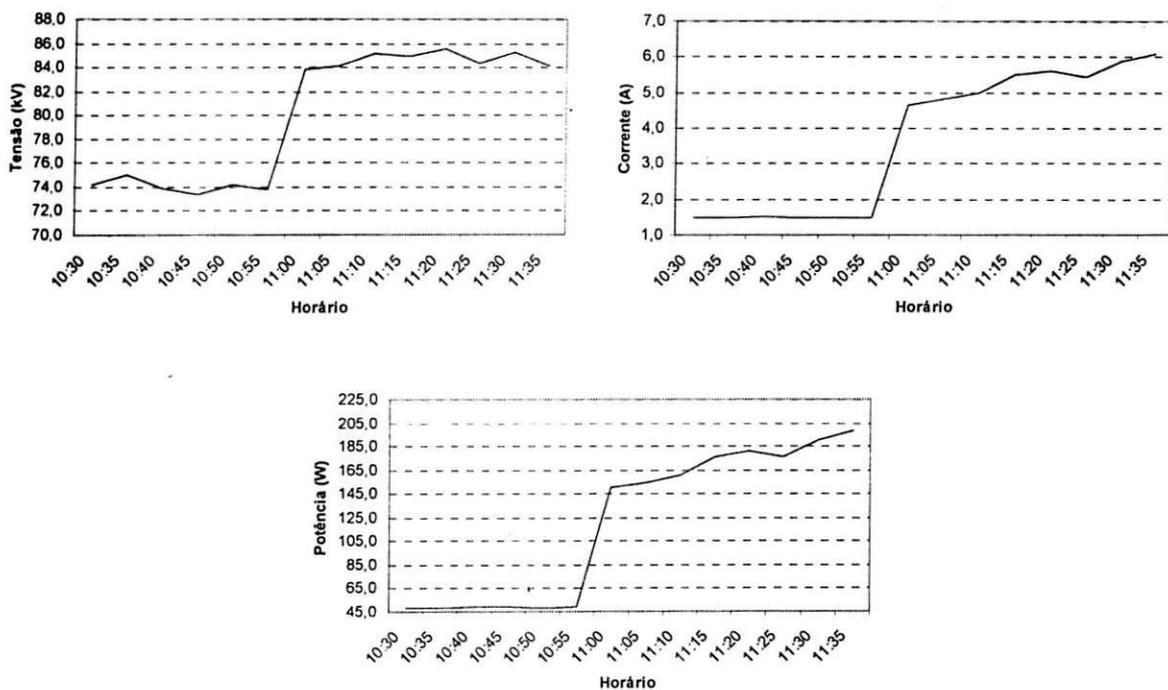


Figura 31. Tensão aplicada e corrente total em fase.

Tais variações de injeção de potência são importantes por ocasionar variações na temperatura do pára-raios, o que aumenta a exigência computacional e comprova a robustez da rotina que o ensaio se propõe a validar. Tendo como entrada características físicas do pára-raios e as potências injetadas, a rotina do modelo eletrotérmico deve fornecer valores de temperatura similares aos medidos pelos sensores. O cálculo das potências que servirão de entrada para o

modelo eletrotérmico é feito através de uma segunda rotina escrita na linguagem MATLAB, que obtém os valores levando em consideração as formas de onda distorcidas de potência e tensão.

Durante a aplicação de alta tensão, a curva de aquecimento do pára-raios foi adquirida pelo OIS-106. Após uma hora e cinco minutos de exposição do pára-raios à alta tensão, às 11:55, o sistema de alimentação foi desligado. O OIS-106 foi mantido ligado e capturando informações por mais seis horas, até que o pára-raios resfriasse completamente.

Cada canal do equipamento registrou a temperatura do seu sensor correspondente cinco vezes, com um intervalo de 10 segundos entre cada uma das cinco aquisições. Quando a quinta aquisição de um determinado canal terminava de ser realizada e após 10 segundos, começava-se o ciclo de cinco aquisições do canal seguinte. As Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 mostram as curvas de aquecimento e resfriamento para os sensores 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

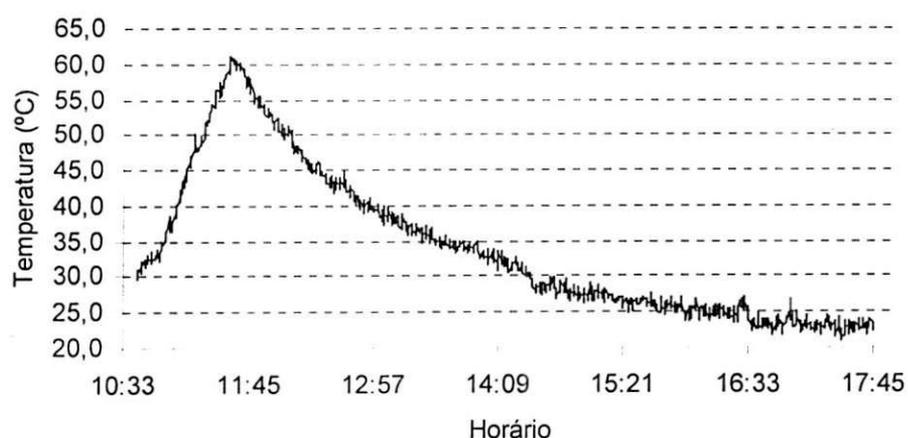


Figura 32. Curva de aquecimento e resfriamento do ponto de aplicação do sensor 1.

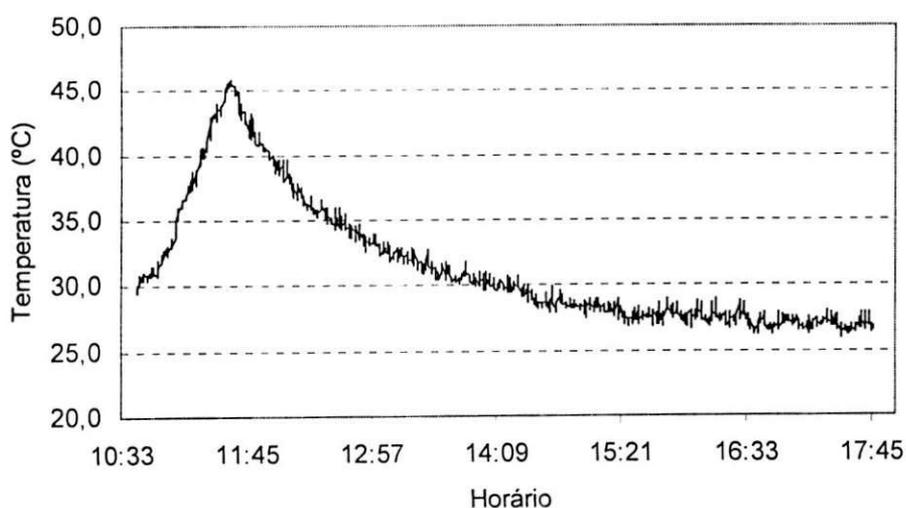


Figura 33. Curva de aquecimento e resfriamento do ponto de aplicação do sensor 2.

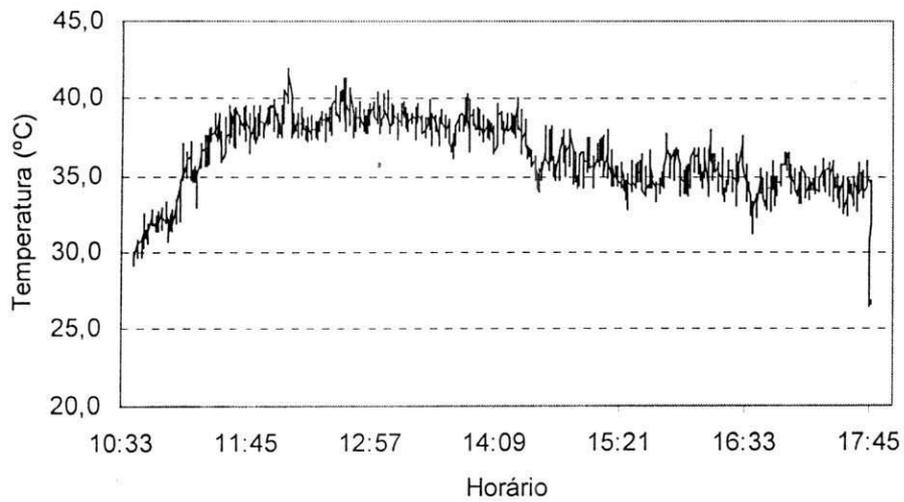


Figura 34. Curva de aquecimento e resfriamento do ponto de aplicação do sensor 3.

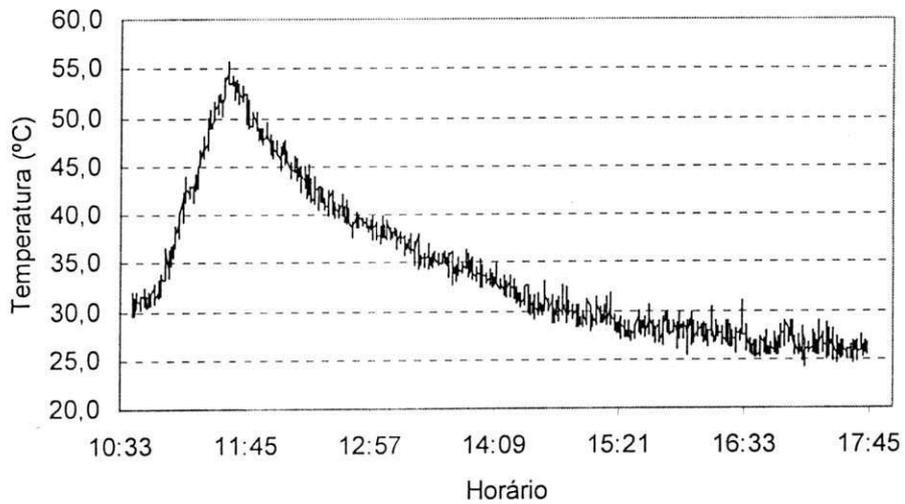


Figura 35. Curva de aquecimento e resfriamento do ponto de aplicação do sensor 4.

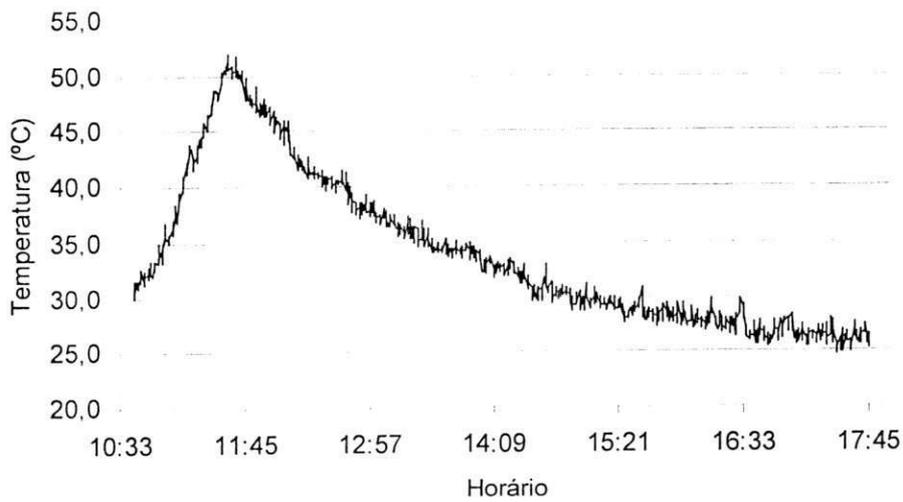


Figura 36. Curva de aquecimento e resfriamento do ponto de aplicação do sensor 5.

Os formatos dos cinco gráficos são bastante semelhantes a curvas de medição de temperatura em outros pára-raios de menor nível de tensão, adquiridas em experimentos anteriores e medidas com termômetros eletrônicos. Além disso, cada uma das curvas tem características particulares advindas do ponto de medição e do material em que o sensor estava fixado.

A curva ilustrada na Figura 32 mostra o comportamento térmico do primeiro varistor da coluna, que está diretamente ligado à fonte de alta tensão e imerso na região mais densa do campo elétrico, portanto, sofrendo maiores exigências elétricas e térmicas. Este é o ponto de medição que atingiu o maior valor de temperatura, chegando a $60,92^{\circ}\text{C}$, às 11:34. O resfriamento deste primeiro varistor é facilitado proximidade com o topo da coluna, chegando a ser comparável com o resfriamento do espaçador. A Figura 37 mostra as curvas suavizadas dos cinco sensores.

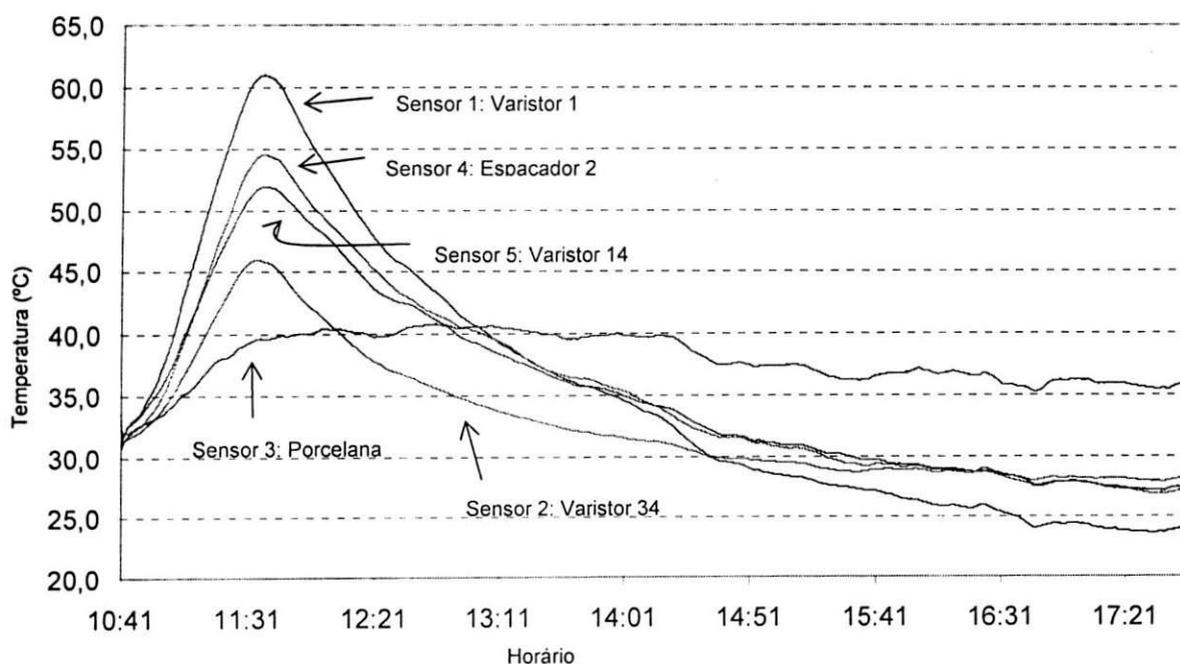


Figura 37. Curva de aquecimento e resfriamento suavizada dos cinco sensores.

Outro comportamento diferenciado do varistor 1 é sua temperatura ao final do ensaio, alguns graus abaixo do valor de temperatura dos demais varistores e do espaçador. Este comportamento pode ser atribuído à condutividade térmica dos materiais envolvidos e a relativa proximidade com o flange do lado fase que troca calor facilmente com o ambiente.

As curvas dos varistores 14 e 34 são análogas à curva do varistor 1, mas apresentam valor máximo menor, o que é de se esperar, pois são varistores na metade e no final da coluna.

Eles são eletricamente menos exigidos. Naturalmente, a curva do varistor 34 atinge um pico menor que o varistor 14, chegando 51,8°C a e 45,8°C, respectivamente.

Comparando-se as curvas do espaçador 2 e do varistor 14, localizados quase na mesma altura na coluna do equipamento, percebe-se que até aproximadamente às 11 horas a temperatura no varistor é maior que a do espaçador. Isto é previsível, pois o espaçador gera muito menos calor internamente que o varistor. Com o passar do tempo, após as 11 horas, o varistor começa a transmitir calor para os varistores superiores e tende a resfriar-se mais eficientemente, enquanto que o espaçador absorve o calor dos varistores acima e abaixo de si. Com isso, o espaçador atinge um valor máximo de temperatura maior.

Todas as curvas tiveram seus máximos aproximadamente ao mesmo tempo, exceto a do sensor 3, que aplicado à porcelana apresentou uma curva retardada. Este comportamento é natural, já que o calor irradiado pela coluna precisa propagar-se através do ar até chegar à porcelana. O sensor 3 também teve a menor amplitude térmica, por ser o único sensor fixado num ponto eletricamente passivo do equipamento. O elevado calor específico da porcelana, além de sua baixa difusibilidade térmica e grande massa contribuíram também para o atraso na curva do sensor 3 e para sua baixa amplitude. Observa-se ainda que, ao final do experimento, quando todos os demais sensores encontravam-se com suas temperaturas praticamente estabilizadas próximas da temperatura ambiente, a porcelana encontrava-se em franco resfriamento. A transmissão do calor de um varistor para o ambiente pode se dar radialmente, via colchão de ar e porcelana, ou via varistores inferiores e superiores, passando para o flange da base ou topo. Parte deste calor que passou pelos flanges chegará à porcelana, por condução. Caso a porcelana atinja um valor de temperatura igual ao do varistor correspondente em sua cota, o calor não mais trafegará radialmente, e a propagação acontecerá completamente pela coluna de varistores, até o centro do flange mais próximo.

8. CONCLUSÕES

A escolha de uma tecnologia recente, para auxiliar a pesquisa do estudo de propagação de calor em pára-raios, foi uma decisão direcionada pelas condições muito particulares que os ensaios com estes equipamentos impõem. As Redes de Bragg mostraram-se como grande promessa na linha de sensores de temperatura, quando imersas em ambientes com altos níveis de campos eletromagnéticos, que inviabilizam outros métodos de sensoriamento.

Ao ser ligado, o termômetro óptico OIS-106, requer um ajuste de offset, para que as diferenças de medida entre os canais sejam aceitáveis, ficando na ordem de décimos de graus. O teste de coerência mostrou que mesmo com variações grandes de temperatura, os seis sensores continuam marcando valores muito próximos uns dos outros, e claro, da referência.

As curvas adquiridas no ensaio correspondem perfeitamente ao que se esperava, mantendo o mesmo perfil que as curvas de aquecimento e resfriamento de outros modelos de pára-raios de menores níveis de tensão, anteriormente ensaiados. Tais curvas permitem a análise dos dados de uma forma tão completa quanto se fossem adquiridas pelos outros métodos anteriormente aplicados. Além disso, o sistema de aquisição permite a captura automática dos valores e seu armazenamento no computador.

Pode-se então, concluir que o sistema está pronto para o uso nos ensaios com pára-raios e certamente tem um comportamento mais preciso que os termômetros eletrônicos. Em trabalhos futuros, a tecnologia experimentada pode ser aplicada a ensaios com outros equipamentos de alta tensão, motores, inversores ou quaisquer outros dispositivos que produzam campos eletromagnéticos suficientemente intensos a ponto de inviabilizar o uso de outros tipos de medição de temperatura.

O trabalho tem uma grande contribuição acadêmica, pois possibilita a colação de grau do aluno. O aprendizado no ambiente do laboratório tem validade especial, pois é meta do aluno seguir a pesquisa e cursar pós-graduação. Além disso, algumas habilidades laboratoriais só podem ser desenvolvidas com a prática realmente aplicada e a percepção dos problemas que surgem durante as montagens e ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COSTA, E. G., "Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco", Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFCG, Campina Grande, PB, 1999.
- KERSEY, A. D., BERKOFF T. A., "Fiber-Optic Bragg-Grating Differential-Temperature Sensor", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 4, no. 10, October 1992
- MATLAB for Windows User's Guide, The Math Works Inc., 1991.
- NÓBREGA, R. S., "Modelo Eletrotérmico de um Pára-raios de Óxido de Zinco", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, PB, 2004.
- SILVA, J. C. C., MARTELLI, C., DIESEL, B. W., FABRIS J. L., KALINOWSKI, H. J., GOOTHOFF, N., CANNING, J. "Termômetro de Alta Temperatura (0-400°) baseado em Redes de Bragg em Fibra Óptica para Aplicação no Setor do Petróleo". Anais do III Seminário Nacional de Controle e Automação Industrial, Elétrica e de Telecomunicações. 2003.
- SOUZA, R. T., COSTA, E. G., S. R. NAIDU, MAIA, M. J., "Ponte Virtual para o Cálculo da Corrente Resistiva em Pára-raios de ZnO", Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2004, Gramado, RS, 2004.
- Tektronix, "Manual do Usuário, Osciloscópio de armazenagem digital das séries TDS1000 e TDS2000", 071-1070-00.
- VALENTE, L. G. V., BRAGA, A. M. B., RIBEIRO, A. S., REGAZZI, R. D., ECKE, W., CHOJETZKI, C., WILLSCCK, R. "Combined Time and Wavelength Multiplexing Technique of Optical Fiber Grating Sensor Arrays Using Commercial OTDR Equipment". IEEE Sensors Journal, Vol. 3, Nº. 1, Fevereiro 2003.
- VALENTE, L. G. V., SILVA, L. C. N., TRIQUES, A., BRAGA, A. M. B., RIBEIRO, A. S., REGAZZI, R. D. "Técnicas de Leitura para Sensores a Fibra Óptica Baseados em Redes de Bragg". Anais da 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador, 2002.
- ZHANG, B., KAHIRIZI, M., "High-Temperature Bragg Grating Waveguide Sensor", Proceedings of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, ICMENS'03.

Sítio da Siemens na Internet: www.siemens.com