

Medição de Temperatura em Seções de Pára-Raios à Base de ZnO Energizados

J.A. França R.C.S. Freire G. S. Deep

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal da Paraíba - DEE - CCT

e-mail: joseaf@dee.ufpb.br

Caixa Postal 10050, 58109-970, Campina Grande - PB
Brasil

Resumo - Apresenta-se um protótipo de um sistema de aquisição de dados para medição de temperatura em seções de pára-raios de ZnO energizadas. As medições são realizadas com termopares e, para garantir o isolamento sem comprometer o arranjo térmico, os sinais são modulados em FM e aplicados a um acoplamento óptico.

Abstract - A prototype of a data acquisition system for temperature measurement along the different sections of ZnO lightning arrester is presented. Thermocouples are employed for temperature sensing and high voltage isolation between these sensors is achieved using a V/F converter (i.e. VCO) and optical coupling to convey the signals to a microcomputer.

I. INTRODUÇÃO

O aumento contínuo da complexibilidade dos sistemas elétricos torna tais sistemas cada vez mais susceptíveis a sobretensões de origem interna e externa, tornando a proteção um dos aspectos mais importantes no projeto das linhas de transmissão e de distribuição. Além disso, uma coordenação de isolamento eficiente também ajuda a reduzir o investimento inicial de construção de uma linha de transmissão, pois reduz os níveis de isolamento requeridos para os equipamentos e componentes utilizados. O principal dispositivo de proteção usado em sistemas elétricos é o pára-raios.

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 SiC e mais recentemente, os pára-raios sem centelhadores, à base de ZnO.

A capacidade de absorção de energia é a característica decisiva na seleção dos pára-raios instalados nos sistemas de extra alta tensão, à proteção de bancos de capacitores em série, à proteção de válvulas tiristorizadas e de filtros nas estações conversoras de alta

tensão contínua [1].

A avaliação experimental do desempenho de um pára-raios apresenta um custo bastante elevado, decorrente da necessidade de reproduzir as condições de operação no campo ou mesmo as exigências das normas técnicas. A avaliação experimental pela utilização de modelos de seção muitas vezes torna-se inconveniente ou não confiável, pois a determinação precisa da equivalência térmica entre o pára-raios completo e a seção utilizada nos ensaios nem sempre é possível. Uma alternativa mais confiável de obter-se os parâmetros térmicos dos pára-raios é o uso de modelos computacionais.

Os modelos matemáticos/computacionais desenvolvidos até o presente não contemplam, conjuntamente, todos os requisitos necessários a uma reprodutibilidade confiável do desempenho do pára-raios quando submetidos a esforços elétricos e térmicos impostos nos ensaios normalizados, na operação em campo, na concepção de novas configurações ou na verificação de equivalência térmica entre pára-raios completo e o modelo de seção. Por isto, uma proposta de um modelo eletrotérmico computacional novo para pára-raios vem sendo desenvolvida no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) [1]. Tal trabalho tem como objetivo estudar a estabilidade, a capacidade de absorção de energia e dissipação térmica dos pára-raios, associados ao seu desempenho elétrico, quando submetidos a diversos esforços.

Neste trabalho, apresenta-se um protótipo de um sistema de aquisição de dados para medição de temperatura em seções de testes de pára-raios de óxido de zinco. As seções são submetidas a sobretensões na frequência industrial com níveis e duração distintos e impulsos de corrente com forma de onda $8/20^1 \mu s$. Os dados medidos são enviados até um microcomputador, no qual são armazenados, podendo-se, posteriormente,

¹Esta notação é muito usada em sistemas de potência e descreve um impulso com tempo de subida de $\approx 8 \mu s$ e tempo de descida de $\approx 20 \mu s$.

analisá-los com a ajuda de programas comerciais.

II. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE DE TEMPERATURA

Para a realização das medições das temperaturas localizadas em um objeto de ensaio em alta tensão foram executadas montagens experimentais, visando analisar a viabilidade técnica do uso de um sistema de aquisição de dados de temperaturas automatizado por microcontrolador e a segurança dos equipamentos e, principalmente, dos operadores.

O sistema inicialmente proposto por Daher e Outros [2] é baseado no microcontrolador 68HC11E2 que realiza as tarefas de comunicação e acionamento para controle de potência e de um conversor A/D de rampa dupla. A aquisição e o armazenamento dos dados coletados são realizados por microcomputador, através do programa gerente AQUISICOM, desenvolvido em linguagem C. Na figura 1, é apresentado o diagrama de blocos desse sistema [2].

Como apresenta-se na figura 1, são inseridos vários sensores para medir a temperatura em diversos pontos do pára-raios. Alguns desses pontos apresentam uma diferença de potencial de alguns milhares de volts entre si, logo uma isolamento elétrico eficiente entre os sensores teria que ser incluída, sem comprometer o arranjo térmico. Entretanto, não foi possível isolar os sensores sem acrescentar inércia térmica ao sistema. Por isso, após inúmeras tentativas, concluiu-se que as medições de temperatura sem o acoplamento óptico individualizado das pontas de prova são inviáveis. Assim, o sistema de aquisição de dados desenvolvido anteriormente [2], não atingiu o objetivo e uma nova proposta teve que ser apresentada.

Esta nova proposta teria que satisfazer principalmente à três exigências de projeto:

- garantir o isolamento individual de cada uma das pontas de prova sem acrescentar inércia térmica;
- automatizar o processo de aquisição de dados; e
- assegurar uma precisão de 1 % nos dados coletados.

Nas próximas seções são discutidas as soluções encontradas para as especificações anteriores, bem como os resultados e as conclusões.

III. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA EM PÁRA-RAIOS

Para atender as especificações da seção anterior, uma outra proposta é apresentada conforme a figura 2.

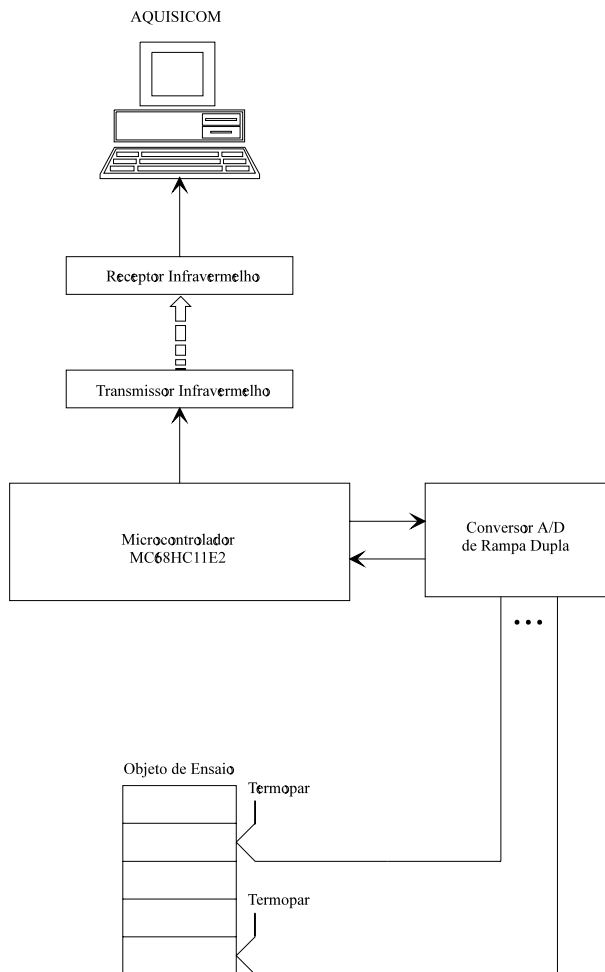


Figura 1: Diagrama de Blocos do Sistema de Aquisição e Controle de Temperatura Proposto por Daher e Freire.

Neste caso, as pontas de prova (termopares) e os circuitos condicionadores são alimentados por bateria. O sinal de cada sensor (após ser amplificado) é modulado e isolado do microcontrolador (que é alimentado pela rede elétrica) por acoplamento óptico. Dessa forma, cada sensor está isolado do sistema. Entretanto, o acoplamento óptico é realizado entre o sensor (que tem saída analógica) e o microcontrolador. Por isto, a recuperação do sinal exigiu um cuidado bem maior, ou seja, para garantir a isolamento e a precisão dos dados, os condicionadores dos sinais de temperatura são alimentados com bateria e em seguida o sinal é modulado antes do acoplamento óptico.

A seguir, são listadas as principais características do sistema de aquisição de temperatura.

- uso de termopares como sensores de temperatura;
- modulação dos sinais dos sensores para melhorar

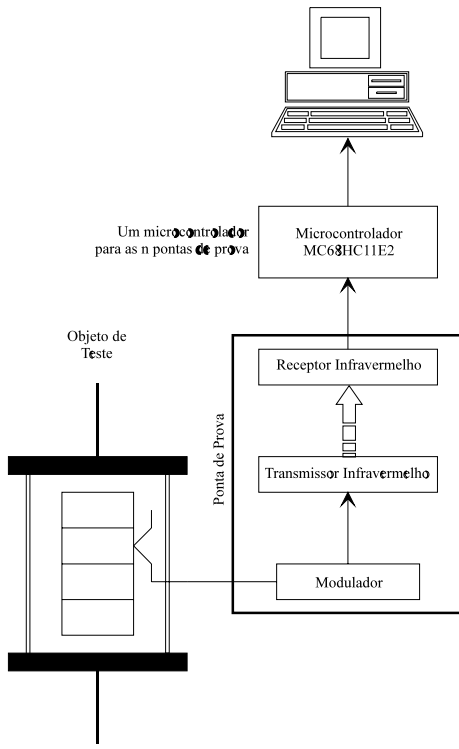


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema de aquisição de temperatura em pára-raios energizados.

a precisão;

- uso de baterias e acoplamento óptico para isolamento;
- microcontrolador 68HC11 para demodulação dos sinais e automação do processo;
- armazenamento dos dados em computador.

Para validação do modelo térmico matemático do pára-raios é necessário que a aquisição de dados seja feita a cada 1 s durante 5 min. Um segundo é um tempo relativamente grande, ou seja, com esta taxa de aquisição tem-se tempo suficiente para fazer, por exemplo, algum tratamento necessário nos dados. Isto facilitou bastante o projeto.

Nas seções que se sequeem são discutidas estas características com mais detalhes.

IV. SENSORES DE TEMPERATURA E ISOLAÇÃO ELÉTRICA

Como sensor de temperatura, usou-se o termopar tipo T (cobre-constantan), pelo seu equilíbrio entre facilidade de uso, linearidade e baixo custo. Um termopar é produzido sempre que dois fios de metais diferentes são unidos por uma de suas extremidades. Neste caso,

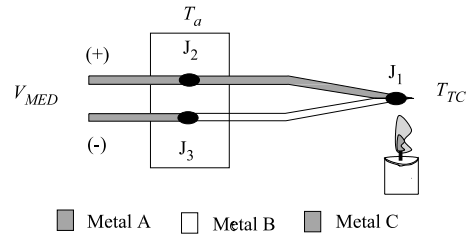


Figura 3: J_1 é o termopar com coeficiente de Seebeck conhecido, J_2 e J_3 são termopares espúrios.

tem-se uma tensão de circuito aberto (tensão de Seebeck) proporcional à temperatura nessa extremidade (junção). Ou seja,

$$\Delta V_S = S(T_{TC})\Delta T_{TC}. \quad (1)$$

Na qual, ΔV_S é a variação da tensão de Seebeck, ΔT_{TC} é a variação da temperatura na junção dos dois metais, e S é o coeficiente de Seebeck que depende da temperatura nesta junção, T_{TC} .

Para medir-se temperatura com termopares, não se pode simplesmente conectar o termopar ao sistema de medição, pois esta conexão cria termopares espúrios. Estes termopares espúrios são ilustrados na figura 3 pelas junções J_2 e J_3 . Neste caso, usando-se a notação $V_{J_x}(T_y)$ para indicar a tensão gerada pela junção J_x devido à temperatura T_y , a tensão medida (V_{MED}) é dada pela equação

$$V_{MED} = V_{J_1}(T_{TC}) + V_{J_2}(T_a) + V_{J_3}(T_a). \quad (2)$$

Na qual, T_a é a temperatura ambiente.

Desse modo, a tensão $V_{J_1}(T_{TC})$ é medida através da equação

$$V_{J_1}(T_{TC}) = V_{MED} - V_{desv}. \quad (3)$$

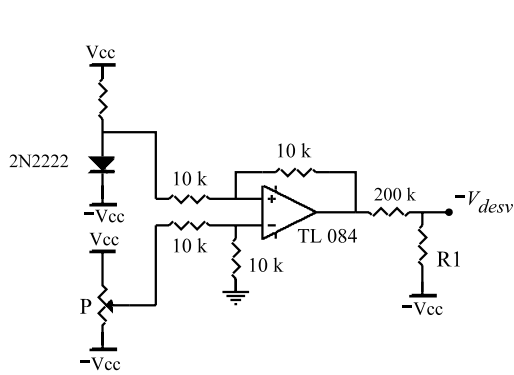
Na qual, $V_{desv} = V_{J_2}(T_a) + V_{J_3}(T_a)$ é uma tensão de desvio gerada por um circuito termômetro.

A tensão V_{desv} pode ser gerada pelo circuito da figura 4. Neste caso é usada a dependência da tensão de condução do diodo com a temperatura. O circuito é baseado no transistor de uso geral o 2N2222 (que foi utilizado como um diodo).

Na figura 5 é apresentado a característica $Temperatura \times Tensão$ do circuito, para $R1 = 3 k\Omega$, para uma pequena faixa de temperatura. Como pode-se ver, o circuito apresenta uma característica bastante linear.

Para somar as tensões V_{desv} e V_{MED} , foi usado o circuito da figura 6. Com o potenciômetro $P1$, pode-se acrescentar uma tensão de desvio. Além disso, o ganho pode ser ajustado com o potenciômetro $P2$.

Os vários amplificadores usados no projeto apresentam uma tensão de desvio. Além disso, como o coeficiente de Seebeck é da ordem de dezenas de $\mu V/^\circ C$, a



1. Escolha R1 tal que a variação da tensão na saída do circuito seja igual ao coeficiente de Seebeck;
2. Ajuste P tal que a tensão na saída do circuito seja igual ao coeficiente de Seebeck multiplicado pela temperatura ambiente.

Figura 4: Circuito de compensação da junção fria de termopares utilizado no projeto de medição de temperatura.

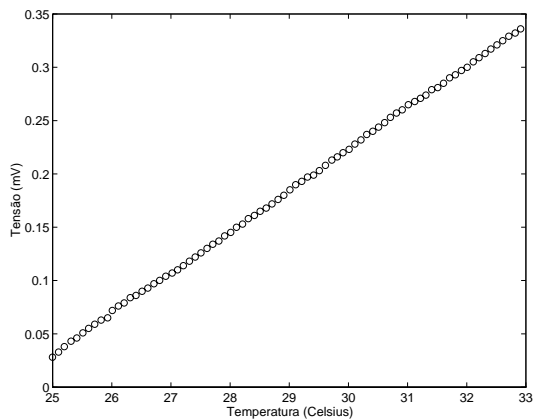


Figura 5: Característica do circuito utilizado para compensação da junção fria de termopares.

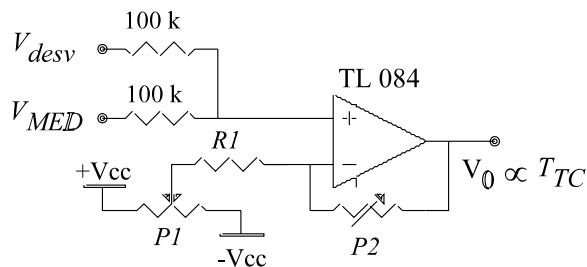


Figura 6: Circuito somador usado para condicionar o sinal dos termopares.

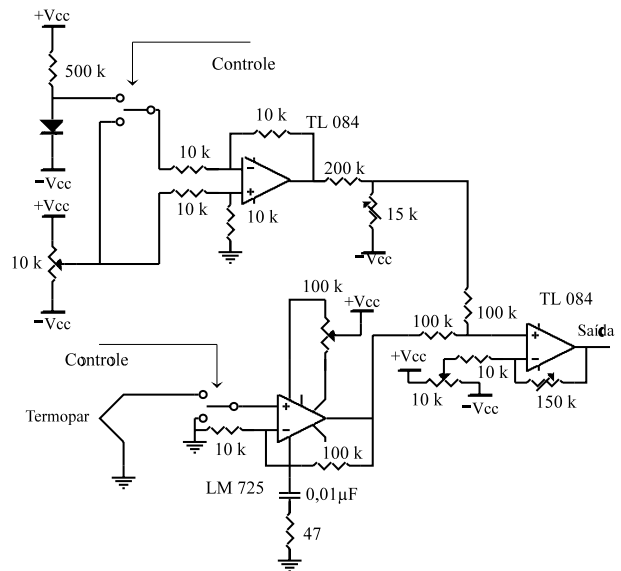


Figura 7: Circuito condicionador do termopar com sistema de chaveamento.

calibragem dos circuitos é muito delicada, podendo-se ter alguns erros provocados por ajustes pouco precisos no ganho e nas tensões de desvio dos circuitos. Por isso, é aconselhável o uso de uma técnica de redução de erros.

O tempo é um dos aliados deste projeto. Por isso, para eliminar o erro cometido por imprecisão nos ajustes do circuito, utilizou-se o esquema da figura 7.

Utilizando um único sinal para o controle das chaves (figura 7), e realizando uma conversão da referência e uma da tensão V_0 (figura 6), pode-se eliminar o erro subtraindo os resultados das duas medições. Então, a partir dos valores dos ganhos e tensões de desvio do circuito da figura 7, obtém-se a tensão de Seebeck (V_S). Em seguida, a partir da equação [3]

$$T_{TC} = 2,593 \times 10^{-2} V_S - 7,603 \times 10^{-7} V_S^2 + 4,638 \times 10^{-11} V_S^3, \quad (4)$$

obtem-se a temperatura desejada (T_{TC}).

Para medir a precisão do circuito da figura 7, foi implementado um sistema de aquisição de dados baseado no barramento IEEE-488. O sistema é composto de uma estufa e um microcomputador com cartão GPIB, conectado a um termômetro e um multímetro, através de barramento IEEE 488. O circuito da figura 7 foi usado para condicionar a tensão de Seebeck enquanto a estufa varia a temperatura sobre o termopar. O multímetro e o termômetro são usados para medir a precisão das medições.

O uso da interface IEEE-488, além de possibilitar uma maior precisão das leituras, automatiza todo o

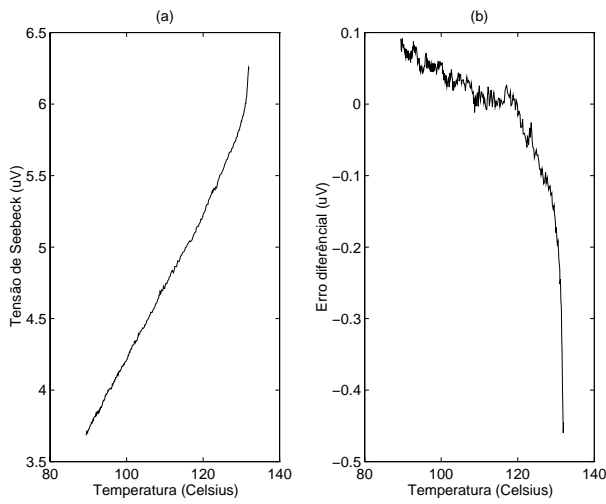


Figura 8: (a) característica $Temperatura \times Tensão$ do termopar cobre-constantan, (b) erro diferencial.

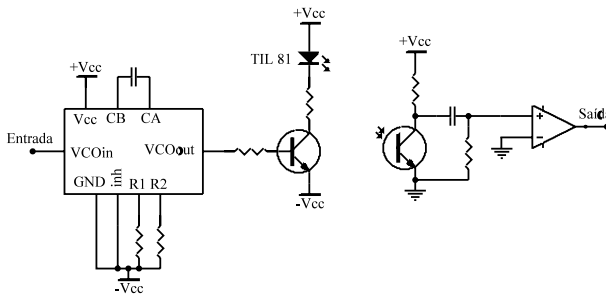


Figura 9: Circuito de modulação FM e acoplamento óptico.

sistema de medição, o que é de grande importância nesta aplicação, devido à duração longa dos ensaios (em média doze horas).

Após várias aquisições e algumas calibrações no circuito da figura 7, conseguiu-se o resultado apresentado na figura 8.

Os testes realizados indicaram uma precisão muito próxima da pretendida, porém ainda é necessário um pouco mais de refinamento nos circuitos utilizados.

V. MODULAÇÃO E ACOPLAMENTO ÓPTICO

Para modulação, optou-se pela FM, pois esta é imune a distorção causada pelo acoplamento óptico. Esta modulação pode ser realizada através de um conversor tensão-frequência ou de um VCO (que simplifica bastante o projeto).

Pela disponibilidade, inicialmente testou-se o VCO contido no CI 4046. O circuito testado foi o da figura 9. Para testar este circuito, foi implementado um sis-

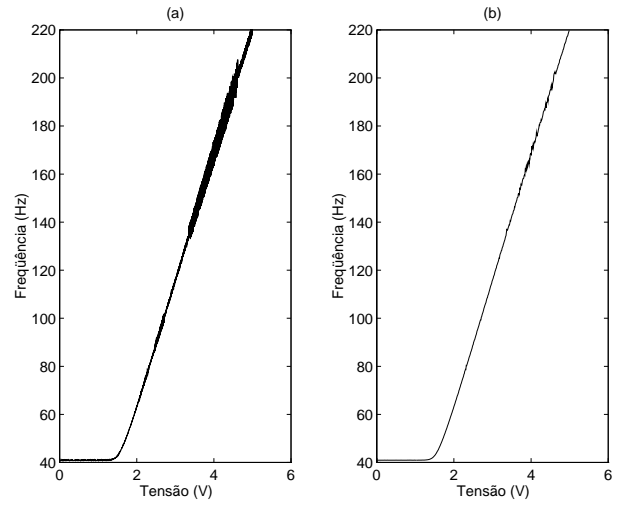


Figura 10: Característica tensão-frequência do circuito modulador FM e do acoplamento óptico. (a) apenas um ponto por amostra e (b) média de dez pontos por amostra.

tema de aquisição de dados baseado no barramento GPIB, no qual utilizou-se uma fonte DC ajustável para simular o sinal do termopar e um osciloscópio digital para medir a frequência da portadora após o acoplamento óptico. O resultado obtido é apresentado na figura 10. A figura 10.a apresenta a característica $Tensão \times Frequência$ do circuito e a figura 10.b, a característica $Tensão \times Frequência$ realizando-se a média de dez pontos consecutivos para redução do ruído. Com esta técnica, conseguiu-se reduzir consideravelmente o ruído e aumentar a linearidade para níveis satisfatórios.

VI. REDUÇÃO DO RÚIDO ADITIVO

Como visto na seção anterior, para usar-se um VCO como modulador FM é necessário tirar a média de um conjunto de pontos. Com isso, considerando-se o erro nas leituras como sendo um ruído aditivo, de média zero e decorrelacionado, consegue-se melhorar bastante a precisão das medições.

Na figura 10.b, pode-se ver que a média de dez amostras já é suficiente para reduzir o ruído. Contudo, preferiu-se obter uma medição a partir da média de 60 pontos, pois neste caso, como cada ponto da média é adquirido com uma taxa de 1/60 s, o ruído de 60 Hz também poderia ser atenuado.

VII. PROGRAMAS GERENTES

O microcontrolador MC68HC11 foi utilizado para automatizar o processo, sendo responsável pela tempo-

rização da aquisição de dados, medição do período do sinal modulado em frequência e envio dos dados até o microcomputador. Nos próximos itens, estas funções são discutidas:

- A medição do período é feita através de uma das portas de captura do microcontrolador, com o auxílio do temporizador. Como o temporizador é de 16 bits, a leitura tem esta resolução. Após a medição do período, o resultado é armazenado em uma memória RAM;
- A temporização da aquisição é feita da seguinte forma: o período do sinal do VCO é medido a cada 1/60 s, durante 1 s. Em seguida, esses 60 dados adquiridos são enviados ao microcomputador, a média dos pontos é feita e uma medição é armazenada no disco rígido, e;
- O envio dos dados para o microcomputador é feito através da porta de comunicação serial do próprio microcontrolador. Como visto no item anterior, os dados são enviados para que a média seja calculada no PC.

Para recepção dos dados, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C. Este programa tem a função apenas de, a cada 1 s, adquirir 60 pontos pela porta serial do PC, realizar a média desses pontos e converter o período do sinal FM (média dos 60 pontos) para a temperatura da seção de teste correspondente.

Os valores das temperaturas medidos são armazenadas no formato ASCII em um arquivo no disco rígido do microcomputador. O usuário do sistema deve então utilizar o programa comercial de sua preferência para analisar os dados.

VIII. CONCLUSÃO

Através do sistema de aquisição de dados desenvolvido com o microcontrolador MC68HC11, o processo de coleta de dados para validação de modelos térmicos de pára-raios à base do ZnO foi bastante automatizado. Para o desenvolvimento de tal sistema, foi necessário o uso de isolamento individual de cada ponta de prova e de um conversor V/F para garantir a integridade das medições através deste isolamento.

O termopar utilizado ainda não possibilita a precisão necessária à aplicação. Isto pode ser devido a uma imperfeição na junção do termopar utilizado. Uma outra alternativa seria sensores RTD's (*Resistance-Temperature Detector*).

Alguns RTD's consistem de uma membrana de platina depositada em um substrato. Neste caso, a curva

$Resistência \times Temperatura$ é bastante linear. Caso seja necessário, pode ser usado alguma técnica de linearização, pois a não-linearidade do RTD é altamente preditiva e repetitiva [4].

IX. AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas de estudo e de pesquisa aos autores durante a realização deste trabalho.

X. RESENHAS BIBLIOGRÁFICAS

J.A. França

Engenheiro Eletricista, Universidade Federal da Paraíba, Brasil (1994). Atualmente é aluno de Mestrado na área de Processamento da Energia na Universidade Federal da Paraíba.

R.C.S. Freire

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Maranhão, Brasil (1980), Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba, Brasil (1982), Doutor em Eletrônica pelo *Automation and Measurements at National Polytechnical Institute of Lorraine*, França (1988). Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

G.S. Deep

Engenheiro Eletricista pelo *Indian Institute of Technology (I.I.T.)*, Kharagpur, Índia (1959), Mestrado em Engenharia Elétrica *Indian Institute of Science*, Bangalore, Índia (1961), Ph. D. em Engenharia Elétrica pelo I.I.T. Kanpur, Índia (1971). Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, Brasil

REFERÊNCIAS

- [1] E.G. da Costa and S.R. Naidu. Análise do desempenho de pára-raios à base de óxido de zinco, março 1997.
- [2] S. Daher, R.C.S. Freire, and G.S. Deep. O controlador de temperatura. Technical report, Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle - UFPB, abril 1994.
- [3] D. Potter. Measuring temperature with thermocouples - a tutorial. Technical report, National Instruments, 1996.
- [4] National Semiconductor. *National Semiconductor*.