

## AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA EM ALTA TENSÃO CONTÍNUA (SIRAT CC)

*Paulo Roberto de Mesquita Nascimento<sup>1</sup>, Ademir Martins de França<sup>1</sup>, Marco Aurelio Soares<sup>1</sup>,  
Luiz Napoleão Pereira<sup>1</sup>, Patricia Cals de O. Vitorio<sup>1</sup>, Danielli Guimarães Costa<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro)  
Duque de Caxias, RJ, Brasil, latra@inmetro.gov.br

**Resumo:** Este artigo apresenta as técnicas e equipamentos empregados durante o processo de automatização do sistema de referência utilizado pelo Laboratório de Transformadores, do Inmetro, na realização de calibrações de instrumentos que operam em alta tensão contínua.

**Palavras chave:** corrente contínua, alta tensão, automação, medição, calibração.

### 1. INTRODUÇÃO

O sistema de referência em alta tensão contínua (SIRAT CC) foi implantado com o objetivo de atender as necessidades da Rede Brasileira de Calibração (RBC), além de proporcionar referência e suporte metrológico, com qualidade e exatidão, ao setor elétrico brasileiro e aos institutos de pesquisa.

O procedimento de calibração adotado para esse sistema descrevia uma operação manual, o que despendia um longo tempo para realização de serviços e não permitia uma análise detalhada do comportamento dos instrumentos.

A crescente demanda de serviços motivou a automatização do sistema para elevar a qualidade das calibrações e agilizar suas realizações. Como o sistema é composto por instrumentos de fabricantes distintos, o laboratório optou por iniciar o desenvolvimento de um programa, utilizando a linguagem LabVIEW, para auxiliar o controle dos equipamentos e registrar os resultados obtidos.

Para controlar a fonte de alta tensão é utilizado um microcontrolador, o qual é oferecido opcionalmente durante a aquisição da fonte, que contém as interfaces serial USB e RS232. As leituras dos valores de tensão são realizadas através dos multímetros, que recebem comandos e enviam informações via interface GPIB.

### 2. MONTAGEM

O sistema é constituído por uma fonte de tensão em corrente contínua de 200 kV, com polaridade negativa e modelo OS200N10, do fabricante Glassman, dois multímetros modelo 3458A, dos fabricantes Hewlett-Packard (HP) e Agilent Technologies, e um divisor resistivo

padrão modelo CA150, obtido junto ao NMI (National Measurement Institute) da Austrália [1].

A fonte de alta tensão recebe as informações de tensão e corrente limite, a ser gerado, através de um módulo de controle remoto, o qual é conectado ao computador utilizando o adaptador USB/RS232. O mesmo possui resolução de 0,1%, 10 bit A/D e 12 bit D/A, o que permite um ajuste de tensão de, aproximadamente, 200 V através do programa [2].

A comunicação entre o computador e os multímetros é realizada por meio de um cabo com conexões USB e GPIB, adquirido junto a National Instruments.

A Figura 1 apresenta um arranjo simplificado dos equipamentos.

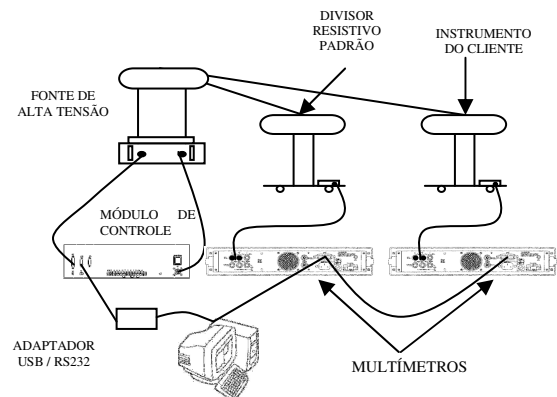


Figura 1 – Montagem do sistema de referência

### 3. TRANSMISSÃO DE DADOS ENTRE FONTE DE ALTA TENSÃO E COMPUTADOR

A comunicação entre a fonte de alta tensão e o computador é estabelecida utilizando sequências de caracteres ASCII codificados. A fonte atua estritamente como um dispositivo escravo, ou seja, a mesma apenas envia dados para o computador após receber um dos seguintes comandos: Set Power Supply (S), Query Power Supply (Q) ou Software Version Level Request (V), este

último utilizado apenas para verificar a revisão do software da fonte.

### 3.1. Comando Set Power Supply

O comando Set contém um total de 18 bytes e instruções para que a fonte altere os sinais que controlam a tensão e a corrente no circuito, além de um controle digital que estabelece o status da mesma. A Tabela 1 apresenta a definição dos bytes desse comando.

Tabela 1. Descrição dos bytes do comando Set

| Byte    | Descrição  |
|---------|--|
| 1       | Caractere de início de mensagem (“SOH”, corresponde a 01 hexadecimal)                  |
| 2       | Caractere identificador de comando (S, corresponde a 53 hexadecimal)                   |
| 3 - 5   | Comando de tensão (0 - $V_{max}$ corresponde a 0 - FFF hexadecimal)                    |
| 6 - 8   | Comando de corrente (0 - $I_{max}$ corresponde a 0 - FFF hexadecimal)                  |
| 9 - 14  | Não implementado   |
| 15      | Controle digital de dados (Alta Tensão ligada, Alta Tensão desligada, Reiniciar Fonte) |
| 16 - 17 | Checksum dos bytes anteriores, exceto o caractere de início de mensagem                |
| 18      | Caractere de fim de mensagem (carriage return corresponde a 0D hexadecimal)            |

O checksum é um método utilizado para detectar erros em uma transmissão. Antes de enviar o comando set, o computador efetua a soma dos bytes 2 ao 9 e registra nos bytes 16 e 17. Ao receber o comando, a fonte realiza uma nova soma dos bytes e confere com o checksum enviado pelo computador, caso os valores não correspondam, a fonte não executa o comando e retorna uma mensagem de erro.

Após o recebimento do comando Set, em caso de detecção de erros, a fonte responde com o pacote Error (E) de 5 bytes, caso contrário, a mesma envia para o computador o pacote Acknowledge (A) de 2 bytes.

A seguir é apresentada a sequência de bytes do comando Set, em hexadecimal, para a tensão de 10 kV e corrente limite de 2 mA.

01 53 30 43 44 33 33 33 30 30 30 30 30 32 46 35 0D

### 3.2. Comando Query Power Supply

O comando Query possui a função de requisitar informações sobre a fonte. Ele é composto por 5 bytes e descrito da seguinte forma: 01 51 35 31 0D, em hexadecimal, onde o byte 51 será o caractere identificador (Q) e o checksum do comando. Quando recebido adequadamente, a fonte envia o pacote Response (R) de 16 bytes, caso contrário, é enviada uma mensagem de erro. A Tabela 2 mostra a descrição dos bytes do pacote Response.

Tabela 2. Descrição dos bytes do pacote Response

| Byte    | Descrição   |
|---------|---|
| 1       | Caractere identificador de resposta “R”                                     |
| 2 - 4   | Tensão monitorada (0 - $V_{max}$ corresponde a 0 - 3FF hexadecimal)         |
| 5 - 7   | Corrente monitorado (0 - $I_{max}$ corresponde a 0 - 3FF hexadecimal)       |
| 8 - 10  | Não implementado  |
| 11 - 13 | Monitor Digital (12 bits codificados em 3 bytes ASCII)                      |
| 14 - 15 | Checksum dos bytes 2 - 13   |
| 16      | Caractere de fim de mensagem (carriage return corresponde a 0D hexadecimal) |

### 3.3. Mensagens de erro

Depois de identificar um erro em um comando, a fonte pode retornar seis diferentes tipos de mensagens de erro. Abaixo são apresentadas características de cada mensagem e o respectivo código em hexadecimal.

- 1) Código de comando indefinido (45 31 33 31 0D) - O caractere de identificação recebido não possui as formas S, Q ou V;
- 2) Erro no checksum (45 32 33 32 0D) - O checksum transmitido no pacote de comando não confere com o calculado a partir dos bytes recebidos;
- 3) Byte(s) extra(s) recebido(s) (45 33 33 33 0D) - Um byte diferente de 0D foi recebido no local do caractere de fim de mensagem;
- 4) Byte de controle digital ilegal no comando Set (45 31 33 31 0D) - Apenas três condições podem ser estipuladas para o byte de controle digital do comando Set, como apresentado na Tabela 1. Este erro é gerado quando o computador requisita mais de uma condição ao mesmo tempo;
- 5) Comando Set ilegal recebido durante uma falha (45 35 33 35 0D) - Erro gerado através do envio do comando Set durante uma falha de interpretação de um comando anterior;
- 6) Erro de processamento (45 36 33 36 0D) - Os dados recebidos são válidos, no entanto foi detectado um erro durante a execução do comando.

## 4. PROGRAMA (SISTEMA DE MEDIÇÃO CC)

O programa é empregado de forma a elevar a segurança de pessoas e instrumentos envolvidos, facilitar a compreensão das informações obtidas e reduzir a ocorrência de erros durante o manuseio dos equipamentos. Ele permite ao operador alterar o valor de tensão, gerado pela fonte, a uma taxa máxima de 2 kV/s, de forma a evitar uma distribuição de tensão não uniforme na cadeia de resistores que compõem o divisor.

Enviar comandos aos multímetros para efetuar medições e gerar gráficos são outras funções também encontradas no programa. Os dados obtidos durante uma calibração podem ser registrados em um banco de dados, enviados para a área de transferência do computador ou salvos em uma planilha do Excel, garantindo assim a integridade dos dados.

#### 4.1. Controle da fonte de alta tensão

O algoritmo implementado recebe os valores desejados de tensão e corrente, inseridos pelo operador, e realiza uma conversão para compor o pacote de dados em hexadecimal, desta forma, tornando o processo de controle da fonte mais prático e menos suscetível a erros.

Os indicadores referentes à tensão e corrente presentes no circuito possuem um algoritmo que trabalha no processo inverso, recebendo o pacote Response da fonte e realizando a conversão para valores absolutos.

A tela inicial do programa, mostrada na Figura 2, apresenta os controladores e indicadores, as mensagens enviadas pela fonte, os controles que tornam possível configurar a comunicação com a mesma através da interface RS232 e o botão, identificado como “Dados do Sistema”, que permite inserir as informações sobre a calibração a ser realizada e cliente solicitante do serviço.

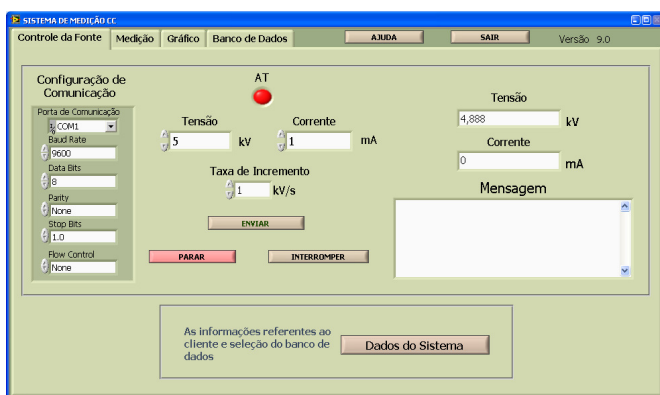


Figura 2 - Tela de controle da fonte

#### 4.2. Medição

O programa permite selecionar um ou dois multímetros, para efetuar as medições, o número de leituras a serem executadas e os comandos a serem enviados para os mesmos, esses parâmetros são definidos pelo tipo de equipamento a ser calibrado.

As funções FIXEDZ e NPLC 100 desempenham papel importante durante as medições. A primeira mantém fixa a resistência de entrada do multímetro em 10 MΩ para todas as faixas de medição, evitando que uma mudança na resistência de entrada, causada pelas variações nas faixas, afete as medições de tensão contínua. A segunda especifica o tempo de integração do conversor A/D em termos de ciclos de linha de energia, essa medida é necessária porque o nível de ruído da fonte normalmente excede a estabilidade da relação do divisor.

Quando utilizada a função FIXEDZ no multímetro conectado ao divisor padrão, a leitura de tensão no sistema é incorreta, pois o multímetro atribui o valor de 10 MΩ ao divisor padrão, no entanto ele é composto por uma associação de resistores equivalente a 225 MΩ. Desta forma, essa função é utilizada, quando necessária, apenas no multímetro referente ao equipamento do cliente.

Quando o instrumento do cliente acompanha um medidor ou é composto por um mostrador para realização das leituras, faz-se necessária a utilização do campo “Leitura

no Display” para inserir os dados, apresentados pelo instrumento do cliente, no computador.

A cada medição o programa apresenta os valores de erro relativo, médias das leituras, incerteza tipo A da medição e fator de relação do equipamento sob calibração. A tela medição, apresentado na Figura 3, ainda permite inserir os dados em uma planilha do Excel, para posterior elaboração do certificado de calibração do equipamento, e registrar as medições em um banco de dados, para futuramente avaliar o comportamento do instrumento ao longo dos anos.



Figura 3 – Controle da medição e análise dos resultados

#### 5. MODO DE OPERAÇÃO MANUAL

O procedimento utilizado para calibrar equipamentos em alta tensão contínua consiste em configurar manualmente as funções no(s) multímetro(s) e montar um sistema de disparo (trigger) externo, de forma a reduzir o efeito de flutuação durante as medições. Para isto, as saídas trigger dos multímetros, localizadas na região traseira do equipamento, foram intelgidas através de cabos tipo BNC e um conector banana de duas pontas, como mostrado na Figura 4. O disparo é realizado curto-circuitando as duas pontas do conector.



Figura 4 – Trigger externo

O controle de tensão e corrente, no sistema de medição, ocorre através do potenciômetro localizado na região frontal do módulo de controle da fonte.

As leituras obtidas no display do multímetro são inseridas em um registro de medição e em seguida digitadas em uma planilha no Excel.

## 6. COMPARAÇÃO ENTRE MODO DE OPERAÇÃO MANUAL E AUTOMATIZADO

Com o intuito de comprovar a eficácia do sistema automatizado, foi realizada a calibração de uma ponta de prova, modelo 80K-40, do fabricante Fluke. Para esta calibração foram adotados os seguintes valores de tensão nominal: 2, 5, 10, 15, 20 e 25 kV. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

As equações (1), (2) e (3) são utilizadas para obter, respectivamente, o valor corrigido do divisor, a relação da ponta de prova e o desvio padrão experimental da média.

$$VD = L_{dp} R_{dp} \quad (1)$$

$VD$  : valor corrigido do divisor

$L_{dp}$  : leitura do divisor

$R_{dp}$  : relação do divisor padrão

O valor da relação do divisor padrão pode ser obtido no certificado de calibração do mesmo.

$$R_{pp} = \frac{VD}{L_{pp}} \quad (2)$$

$R_{pp}$  : relação da ponta de prova

$L_{pp}$  : leitura da ponta de prova

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$s$  : desvio padrão experimental da média

$\bar{X}$  : média das medições

$n$  : número de medições

**Tabela 3 – Resultado da calibração no modo manual**

| Média das leituras do divisor padrão (V) | Valor corrigido do divisor (V) | Média das leituras da ponta de prova (V) | Relação da ponta de prova | Desvio-padrão experim. da média (Incerteza tipo A) (V) |
|--|--------------------------------|--|---------------------------|--|
| 0,1369600                                | 2054,59167                     | 2,072878                                 | 991,179753                | 0,000308   |
| 0,3377330                                | 5066,46524                     | 5,114124                                 | 990,681483                | 0,000050   |
| 0,6681153                                | 10022,4313                     | 10,12901                                 | 989,411858                | 0,000116   |
| 1,0006130                                | 15009,8962                     | 15,19040                                 | 988,117424                | 0,000175   |
| 1,3306191                                | 19960,2187                     | 20,22695                                 | 986,813046                | 0,000225   |
| 1,6608511                                | 24913,9299                     | 25,27683                                 | 985,642820                | 0,000266   |

A execução deste no modo de operação proporciona um grande intervalo entre leituras, devido à necessidade de registrá-las manualmente antes de efetuar um novo disparo para aquisição de medições.

**Tabela 4 – Resultado da calibração no modo automatizado**

| Média das leituras do divisor padrão (V) | Valor corrigido do divisor (V) | Média das leituras da ponta de prova (V) | Relação da ponta de prova | Desvio-padrão experim. da média (Incerteza tipo A) (V) |
|--|--------------------------------|--|---------------------------|--|
| 0,1367297                                | 2051,13655                     | 2,06885                                  | 991,435018                | 0,000045   |
| 0,3376050                                | 5064,54547                     | 5,11195                                  | 990,725541                | 0,000035   |
| 0,6680193                                | 10020,9917                     | 10,12712                                 | 989,454508                | 0,000040   |
| 1,0004799                                | 15007,8992                     | 15,18768                                 | 988,162820                | 0,000077   |
| 1,3306028                                | 19959,9741                     | 20,22608                                 | 986,843370                | 0,000055   |
| 1,6607993                                | 24913,1528                     | 25,27704                                 | 985,604171                | 0,000035   |

A melhora na qualidade da calibração pode ser observada com a redução da Incerteza tipo A, atribuída às medições.

## 7. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do programa “Sistema de Medição CC” proporcionou, ao Inmetro, uma grande melhora na qualidade dos serviços de calibração de instrumentos que operam em alta tensão contínua, além de agilizar o processo de medição e oferecer maior segurança a equipamentos e pessoas envolvidas. Desta forma o Laboratório de Transformadores passa a conhecer melhor os fatores que influenciam no valor final da incerteza de medição do sistema de referência.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. M. França, P. R. M. Nascimento, L. N. Pereira, M. A. Soares, P. C. O. Vitorio, D. G. Costa, G. C. Moreira, “Implantação e Implementação do Sistema de Referência em Alta Tensão em Corrente Contínua (SIRAT CC) na Faixa de 100 V a 150 kV”, 8º Seminário internacional de Metrologia Elétrica (Semetro), Paraíba, Brasil, Junho de 2009.
- [2] Glassman - High Voltage Source - Model OS200N.