Monitoramento de Acumuladores em Subestações

Prof. M. M. Werneck [(1)], Cesar Cosenza de Carvalho, Fernando Luiz Maciel, Ricardo Marques Ribeiro, Francisco Roberto Reis França [(2)] e Plinio Porciuncula

***Resumo*- A vida útil média de bancos de acumuladores de subestações está em torno de de 10 a 12 anos, entretanto, alguns elementos podem se deteriorar e falhar na hora da operação. A manutençao preventiva é executada periodicamente de forma a testar a operacionalidade desses elementos de bateria. Estes testes, normalmente executados em forma de descarga em resistências despadronizadas, são manuais e sem um procedimento otimizado que possa produzir parâmetros que propiciem a avaliação da vida útil dos elementos. Assim, estes tradicionais testes podem diminuir a vida util desses importantes equipamentos, colocando todos os sistemas envolvidos (Subestações, Unidades Geradoras etc.) operando com uma probabilidade de falha elevada.**

Este trabalho apresenta uma metodologia moderna, desenvolvida de acordo com o estado da arte, que permite a avaliação da vida útil em tempo real sem necessariamente colocar em risco ou diminuir a vida útil através de descargas profundas.

O projeto iniciou-se com uma coleta de informações, estudo bibliográfico e pesquisa com fabricantes e bancos de dados internacionais que levou a uma compreensão das técnicas mais apropriadas e periodicidade ideal para avaliar a vida útil e, ao mesmo tempo, extrair parâmetros que propiciaram a avaliaçao do estado atual e a provável vida util de cada um de seus elementos.

A etapa seguinte compreende o desenvolvimento de um hardaware microprocessado de baixo custo que mede parâmetros dos acumuladores fornecendo indicação aos operadores do estado atualizado do banco de acumuladores.

Este projeto é um desenvolvimento conjunto entre o Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) e a concessionária Eletronorte.

Palavras-chave—**Acumuladores, bateria, impedância, condutância, subestação.**

Estes trabalho foi apoiado parcialmente pela Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletronorte.

1 Laboratório de Instrumentação e Fotônica da COPPE/UFRJ (http://www.lif.coppe.ufrj.br)

2 Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletronorte

I. Introdução

A última linha de defesa perdas críticas de energia em subestações (SE) tem sido historicamente os bancos de baterias de corrente contínua. Estas baterias são vitais na confiabilidade uma SE, pois é através delas que toda a supervisão e controle de uma SE mantém seu funcionamento em caso de falha de energia.

A vida útil de bancos de acumuladores de subestações é em média de 10 a 12 anos, mas alguns elementos podem se deteriorar e falhar na hora de operar. A manutenção preventiva é executada periodicamente de forma a testar a operacionabilidade desses elementos de bateria. Estes testes, normalmente executados em forma de descarga em resistências, são executados manualmente e sem um procedimento otimizado que possa produzir parâmetros que propiciem a avaliação da vida útil dos elementos. Estes tradicionais testes de descarga em bancos de baterias podem diminur a vida útil desses importantes equipamentos, e colocam todos os sistemas envolvidos (Subestações, Unidades Geradoras, No-Breaks, Etc..) operando com uma probabilidade de falha elevada.

Uma metodologia moderna, desenvolvida de acordo com o estado da arte, permitiria aumento da vida útil e uma maior confiabilidade operacional.

Entretanto não existe um consenso entre os operadores de SE de como garantir que as baterias estão operacionais e com a carga apropriada para suprir a energia de emergência por um período de tempo apropriado até que se restabeleça a energia em corrente alternada.

Alguns autores (vide bibliografia), por outro lado, tem sugerido a utilização da medida de impedância da bateria como um parâmetro que pode informar o seu “estado de saúde” bem como seu estado de carga.

Em vista disso o Laboratório de Instrumentação e Fotônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro propôs um projeto à Eletronorte para desenvolver uma nova metodologia que permita uma avaliação das baterias em tempo real e estude devidamente estes aspectos. Este trabalho apresenta os resultados desta pesquisa que levou ao desenvolvimento de um protó-

tipo de medida de impedância de baterias. Este protótipo foi testado frente a dois outros equipamentos comerciais de medida de impedância para comparar sua performance.

II. Históricos dos Protótipos

Neste item apresentamos um pequeno histórico dos protótipos desenvolvidos que culminou no último (P-04) que foi levado a teste de campo.

O primeiro protótipo (P-01) é mostrado na Figura 1. Ele continha um amplificador linear e suas medidas eram manuais com equipamentos externos. A relação sinal/ruído era ruim mas nos mostrou que o caminho estava certo.

O protótipo P-02 (Figura 2) continha também um amplificador linear mas com a diferença de que era integrado e de melhor performance. Ele apresentou uma relação sinal/ruído ainda ruim, apesar de melhor que o anterior.

Para melhorar a relação sinal/ruído optamos por um amplificador digital contendo MOS-FETs de última geração. Eles eram acionados por um clock digital e as medidas ainda eram manuais. O protótipo P-03 é mostrado na Figura 3.

Note no protoboard ao lado do P-03 um microcontrolador tipo PIC. Trata-se de uma melhoria do sistema tornando tanto o acionamento quanto as medidas automáticas. Com estas implementações chegamos ao protótipo P-04.

O protótipo P-04 (Figura 4) contém um algorítimo de calibração para facilitar futuras calibrações periódicas. Estas calibrações periódicas são necessárias em qualquer equipamento de medida principalmente naqueles que medem corrente através da tensão em resistores de referência, que é o caso deste equipamento. Note ainda que, conforme será mostrado abaixo, os outro equipamentos de medida de impedância ou condutância da Eletronorte não dispõem de tal recurso e hoje apresentam desvios da medida. O conector de programação fica no painel frontal (PRG) e pode ser visto na figura. Sua operação é bem simples: bata conectar as ponteiras no elemento a ser medido e pressionar o botão “MEDIR”.

Figura 1 Protótipo P-01.

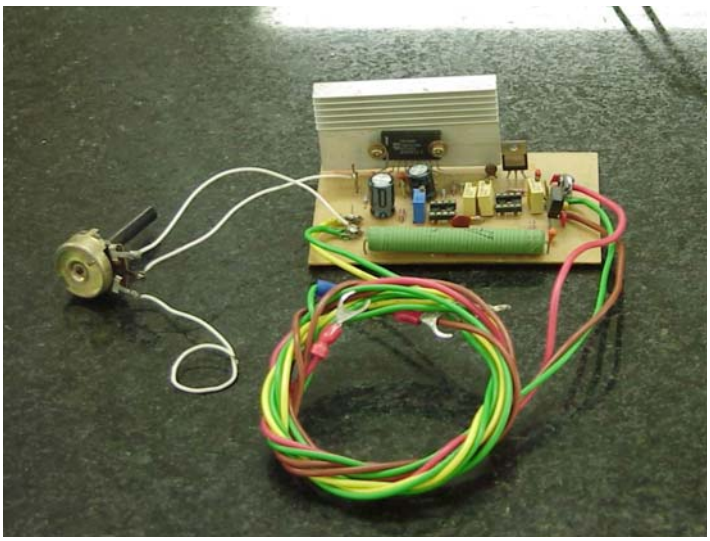


Figura 2 Protótipo P-02.

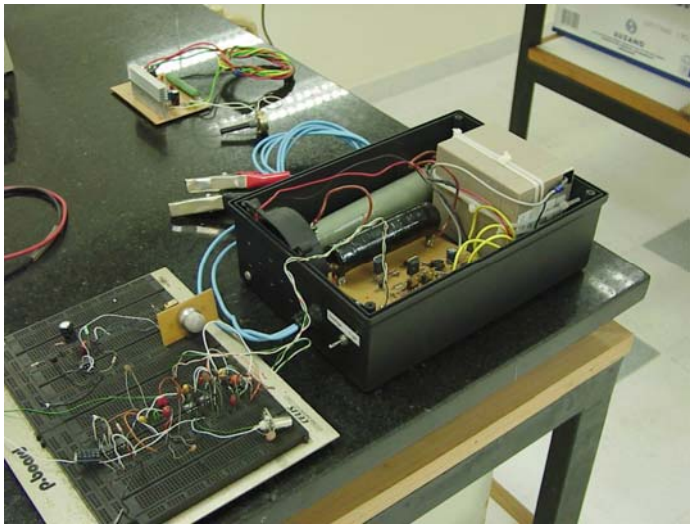


Figura 3 Protótipo P-03.

Figura 4 Protótipo P-04.

III. CONDUTÂNCIA, IMPEDÂNCIA E RESISTÊNCIA

Antes de descrever os experimentos e resultados obtidos será necessário esclarecer a termininologia utilizada neste trabalho.

Impedância, com unidade Ohm [Ω] é um vetor complexo resultado da relação entre o vetor tensão [Volts] e o vetor corrente [Ampere]. Contém uma parte real chamada de resistência e uma parte imaginária chamada de reatância. A reatância pode ser positiva e neste caso chamada de reatância indutiva ou negativa, chamada de reatância capacitiva, obviamente designando o comportamento indutivo ou capacitivo do circuito para aquela frequência na qual a impedância foi medida.

Admitância é, por definição, o inverso da impedância com unidade Mho hoje mais conhecida como Siemens [S]. Condutância é o inverso da resistência com unidade também Siemens.

Pela definiçao acima, obviamente obteremos a admitância dividindo o vetor corrente pelo vetor tensão ou simplesmente invertendo o valor da impedância. Para se obter o valor da condutância é só inverter o valor da resistência.

Os equipamentos de medida das baterias tratados neste trabalho medem a impedância das baterias numa determinada frequência e informam para o operador o módulo desta (raiz quadrada da soma do quadrado da resistência com o quadrado da reatância).

O método de medida é o mesmo utilizado por um ohmímetro convencional: injeta-se uma tensão no resistor a ser medido e mede-se a corrente resultante. Dividindo-se a tensão pela corrente obtem-se a resistência. No caso dos equipamentos de medida de impedância das baterias existem duas diferenças primordiais: Uma é que eles injetam uma tensão AC, senoidal ou quadrada, pois trata-se de impedãncia no domínio da frequência e não uma resistência pura. A outra diferença é que eles utilizam o método Kelvin, de quatro pontos, para a medida de resistência.

A frequência utilizada difere para cada fabricante, entretanto todos utilizam frequências baixas, no range de 20 a 100 Hz, para ser possível enxergar a reatância capacitiva. Esta é devido ao grande efeito capacitivo de uma bateria, uma vez que o acúmulo de carga elétrica que a bateria tem se assemelha a um grande capacitor. Assim, se queremos medir carga, temos que poder medir a capacitãncia.

Como o valor da impedância é muito pequeno, da ordem de centenas de micro-ohms, alguns fabricantes preferem informar a admitância (o inverso da impedância) que é da ordem de kilo-Siemens [kS].

Erroneamente, alguns fabricantes chamam esse valor de condutância que é um termo equivalente à resistência, ou seja, utilizado apenas em correntes contínuas (CC) o que não é o caso de medida de impedância de acumuladores. O certo seria informar a impedância ou a admitância. Teoricamente, entretanto, informar a impedância ou a "condutância" dá no mesmo pois uma é o inverso da outra.

IV. TESTES DE CAMPO COM O PROTÓTIPO LIF

Resultados discrepantes iniciais realizados em bancos de acumuladores com o protótipo P-03 nos levaram a uma redefinição da técnica de medida utilizada no protótipo. A causa do erro foi identificada e a partir de uma nova técnica de medida finalmente obtivemos medidas repetitivas e confiáveis com o protótipo P-04. Desenvolvemos então uma giga de calibração que foi utilizada para calibrar quantitativamente o protótipo LIF. Esta giga não foi, por sua vez, calibrada por falta de laboratório de calibração apropriado no Rio de Janeiro, mas cálculos de incerteza nos levaram a valores próximos de 5% de erros. Assim o protótipo foi calibrado com essa incerteza e a partir daí passamos à fase de testes.

O primeiro teste de campo foi efetuado no LIF em banco de 6 baterias novas reguladas por válvula do tipo 5OPzV 350 2V da Saturnia com descarga controlada a partir de uma lâmpada de 12 V por 50 W. Durante a descarga a condutância e a tensão de cada elemento foram medidas periodicamente. O gráfico da Figura 5 mostra a curva de descarga até um valor de tensão de 1,98 V.

Note o ponto indicado por "Interrupção de descarga". A descarga foi interrompida durante a noite para ser reiniciada no dia seguinte. Ocorreu justamente o esperado: as baterias recuperam naturalmente um pouco de sua carga por redistribuição dos íons dentro do eletrólito durante o tempo de descanso.

Note a correlação aproximadamente linear da condutância com a carga restante no banco.

O segundo teste foi efetuado em campo num banco de 24 acumuladores do tipo 6OPzV600 de 600 A-h da SE Vila do Conde com o apoio de dois técnicos da Eletronorte. Neste caso a medida de condutância foi efetuada por três diferentes equipamentos: Midtronics, AVO (ambos pertencentes à Eletronorte) e o protótipo LIF. A descarga foi controlada por uma resistência variável de forma a manter a corrente em 9,6 A. Com essa corrente, seguindo as curvas do fabricante, seria possível descarregar os elementos em 62 horas (até uma tensão final de 1,75 V) que estava dentro dos três dias disponíveis para o teste.

A Figura 6 mostra fotos tiradas durante as medidas. Na Figura 7 mostramos uma foto do AVO e na Figura 8 o AVO em uso, aparecendo a ponteira em primeiro plano na mão do técnico da Eletronorte.

A Figura 9 mostra o gráfico da condutância em função do tempo de descarga para o elemento 15.

Num determinado momento a corrente foi grandemente aumentada para acelerar a descarga até uma tensão final de 1,75 V.

A Figura 10 mostra o gráfico da condutância média dos 24 acumuladores medida com cada um dos equipamentos em função da carga média remanescente. Note a correlação das condutâncias com respeito à carga. Note também a diferença constante entre os valores de cada um dos instrumentos. Os valores negativos de carga no gráfico da Figura 10 indicam que a carga real da bateria era de fato maior do que aquela informada pelo fabricante. Trata-se de uma espécie de coeficiente de segurança.

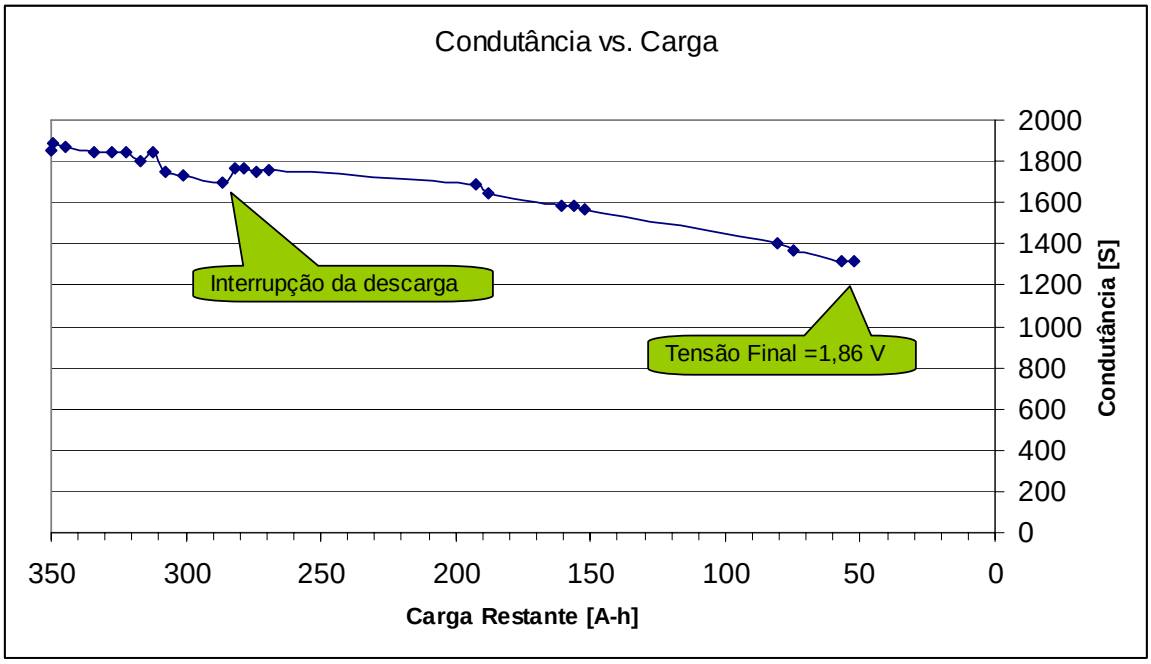


Figura 5 Gráfico da condutância média em função da carga restante de um banco de acumuladores do tipo 5OPzV 350 2V (350 Ah).

Figura 6 O protótipo P-04 em uso na SE Vila do Conde. Da esquerda para a direita as pessoas na foto são: Marcos Lage e Paulo Braga, técnicos da Ele-

tronorte e Fernando Maciel, técnico do LIF.

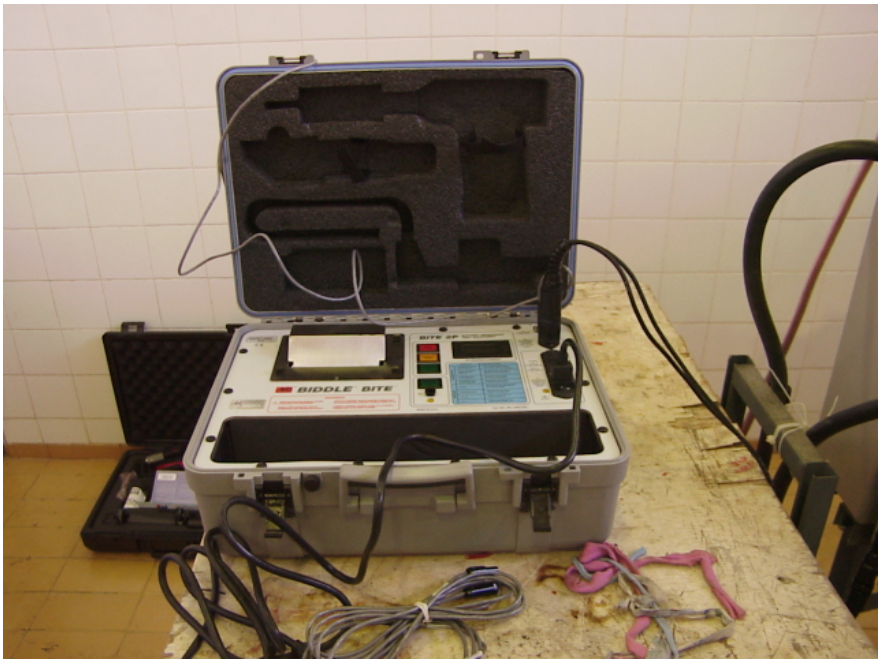


Figura 7 Foto do equipamento AVO.

Figura 8 O equipamento AVO em uso.

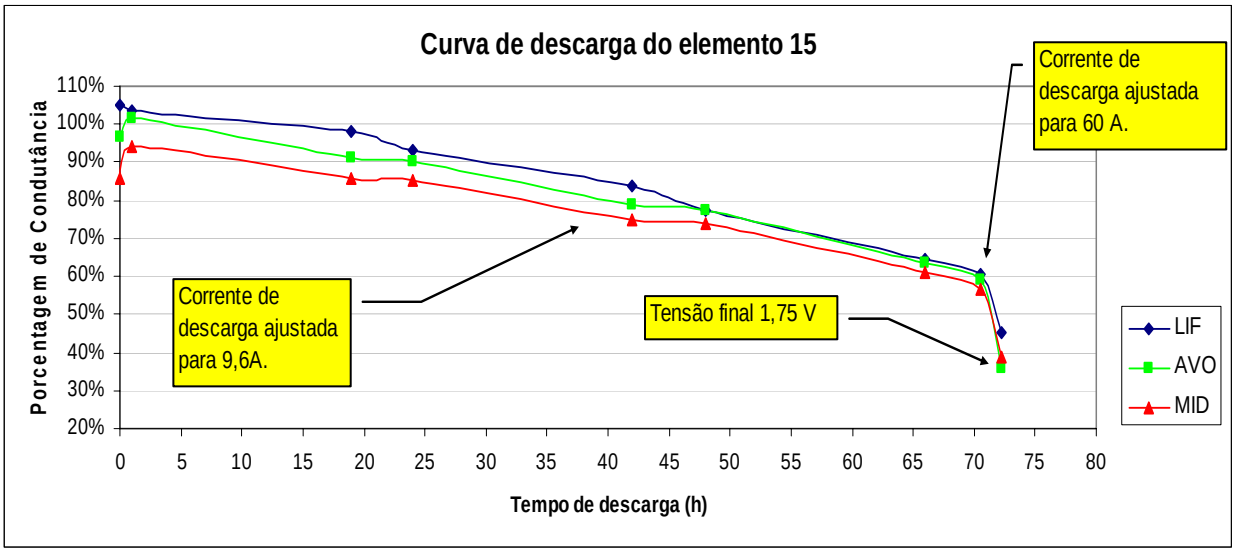


Figura 9 Gráfico da condutância em funçao do tempo de descarga para o elemento 15 medida pelos três equipamentos: P-04 (LIF), AVO e Midtronics (MID).

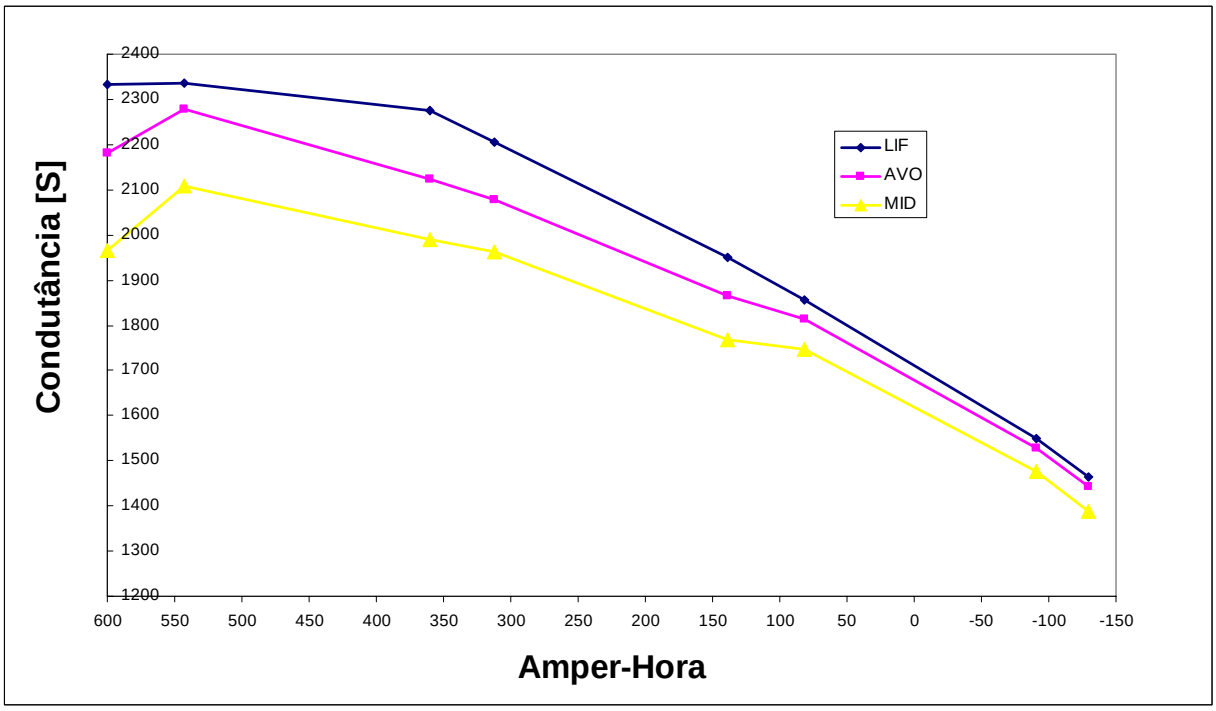


Figura 10 Gráfico da condutância média dos 24 acumuladores em função da carga média remanescente medida com cada um dos equipamentos.

V. Conclusões com respeito à performance do protótipo comparada aos outros dois equipamentos comerciais

Pelos gráficos das figuras 9 e 10 verificamos uma diferença constante de calibração nos três instrumentos em valores de aproximadamente 10%. Tendo em vista que nenhum dos três tinha uma calibração rastreada a algum laboratório certificado, não é possível inferir qual aparelho apresentava erro e qual estaria medindo certo. Conforme explicado anteriormente, o P-04 do LIF estaria com 5% de incerteza o que leva-se a concluir que o Midtronicas estaria também com erro de até 5%. Entretanto, estas são apenas considerações qualitativas, seria necessário calibrar os equipamentos na RBC para se ter certeza de seus erros.

Conforme será visto adiante, o P-04 é o único dos três equipamentos que é calibrável. Para se calibrar os outros seria necessário utilizar o P-04 como padrão secundário e calibrá-los por comparação.

VI. TÉCNICAS DE MEDIDAS DOS EQUIPAMENTOS

Descreveremos aqui as estratégias de medidas de cada um dos três equipamentos para ser possível que se entenda a afirmação feita no último parágrafo do item anterior.

Com relação à calibração é necessário esclarecer as diferenças entre os equipamentos. O protótipo LIF mede diretamente a impedância quer seja de uma bateria ou de um resistor padrão. A técnica utilizada é a de injetar uma tensão alternada na bateria através de uma chave digital e medir a corrente e a tensão resultantes. A tensão é medida diretamente em cima dos terminais da bateria e a corrente é medida atraves da queda de tensão em cima de um resistor de referência dentro do instrumento. O microporcessador do instrumento faz a conta da relação corrente/tensão obtendo a admitância. A Figura 11 mostra o esquema simplificado do circuito interno do P-04.

O AVO injeta uma tensão em todo o banco, fazendo fluir uma corrente por todos os elementos e, a partir de um medidor portátil, mede a tensão AC gerada em cada elemento juntamente com a corrente. Depois divide a corrente pela tensão obtendo a admitância. O esquema simplificado do sistema é mostrado na Figura 12.

O Midtronics não injeta corrente mas utiliza a própria tensão do elemento num resistor interno ao aparelho medindo a tensão resultante e a corrente, conforme mostrado na Figura 13. Por esta razão o Midtronics não funciona independente, pois parte de seu circuito é a bateria sob teste. Se esta estiver completamente descarregada ou com baixa tensão o aparelho não funciona.

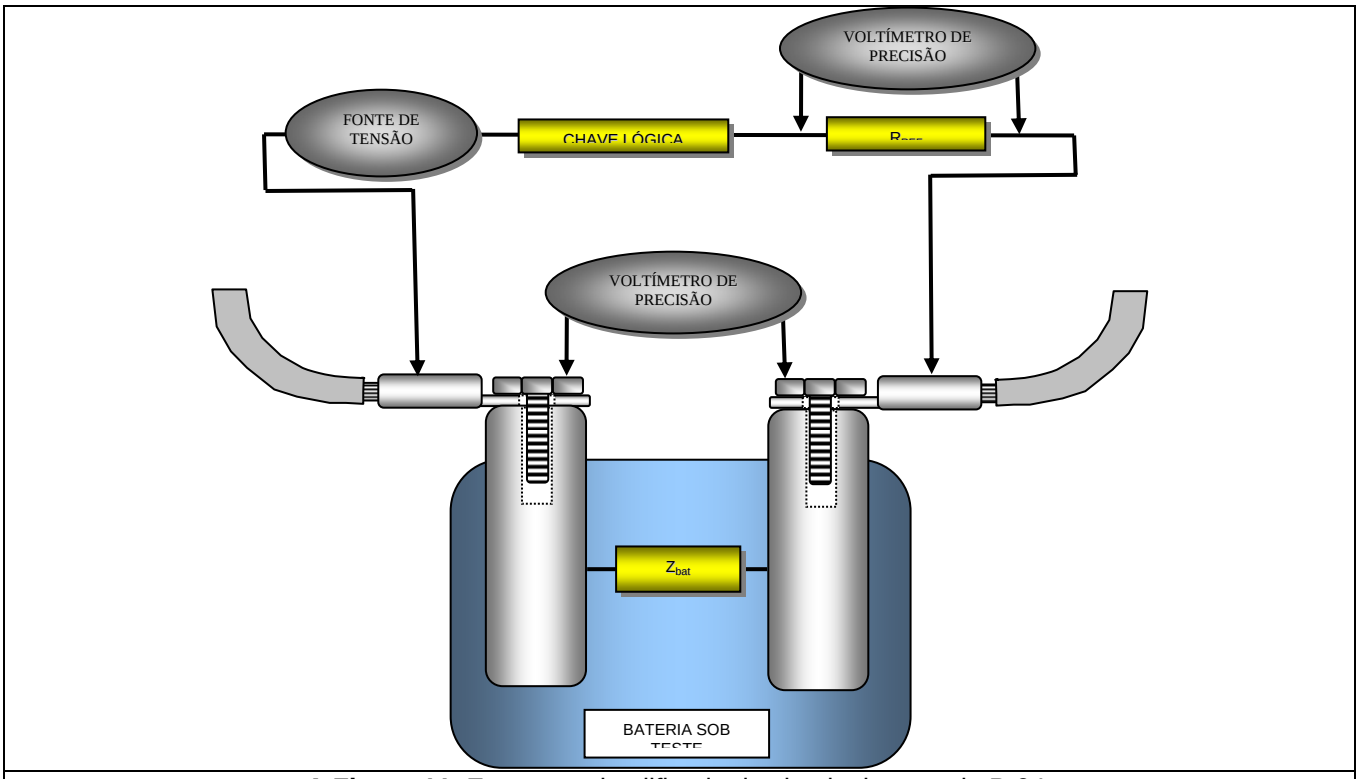
Assim, vemos que cada equipamento tem sua própria estratégia de medida o que leva a dificuldades de calibração.

Para se calibrar os equipamentos poder-se-ia fazê-los medir resistores rastreados comparando-se os resultados. Entretanto os menores resistores encontrados em laboratórios de calibração são de 1 mΩ, valor muito acima do range de impedância de acumuladores que é em torno de 500 a 800 $\mu\Omega$. Existem, por outro lado, pontes de impedância que podem medir esses valores de resistência. Desta forma a única solução para nós foi criar resistores-padrão a partir de fios de cobre e medi-los com ponte de impedância rastreada. Porém, nos laboratórios da Eletronorte (Lacen) não foi possível calibrar a nossa giga de teste por falta de equipamento apropriado.

Por outro lado, ao tentarmos utilizar o Midtronic para medir o nosso resistor padrão ele não funcionou. O Midtronics não consegue medir um resistor puro pois, conforme foi explicado acima, ele necessita de uma tensão externa (proveniente do elemento sob teste) para gerar a corrente. Assim este somente pode ser calibrado por comparação com outro equipamento calibrado medindo-se a mesma bateria. Não há como variar um padrão dentro do range e verificar sua curva de linearidade. Enfim, quem dispõe de um aparelho desse dificilmente vai saber a incerteza e o erro de medida ou se houve um desvio de calibração com o tempo.

Já o AVO, que dispõe de uma fonte de tensão externa, apresentou outro problema que foi o receio dos técnicos da ELN de colocar os terminais da fonte de corrente diretamente ligada em nosso resistor padrão. Seria praticamente um curto-circuito (muito embora uma fonte de corrente funciona necessariamente em curto).

Assim, não foi possível medir ou comparar erros dos dois instrumentos comerciais. A única solução é calibrar o P-04 através de um resistor padrão rastreado e com isso calibrar os instrumentos comerciais por comparação. Estamos dando continuidade ao projeto no sentido de calibrar nosso resistor padrão transformando-o em padrão secundário e com ele calibrar o protótipo LIF.



A Figura 11 Esquema simplificado do circuito interno do P-04.

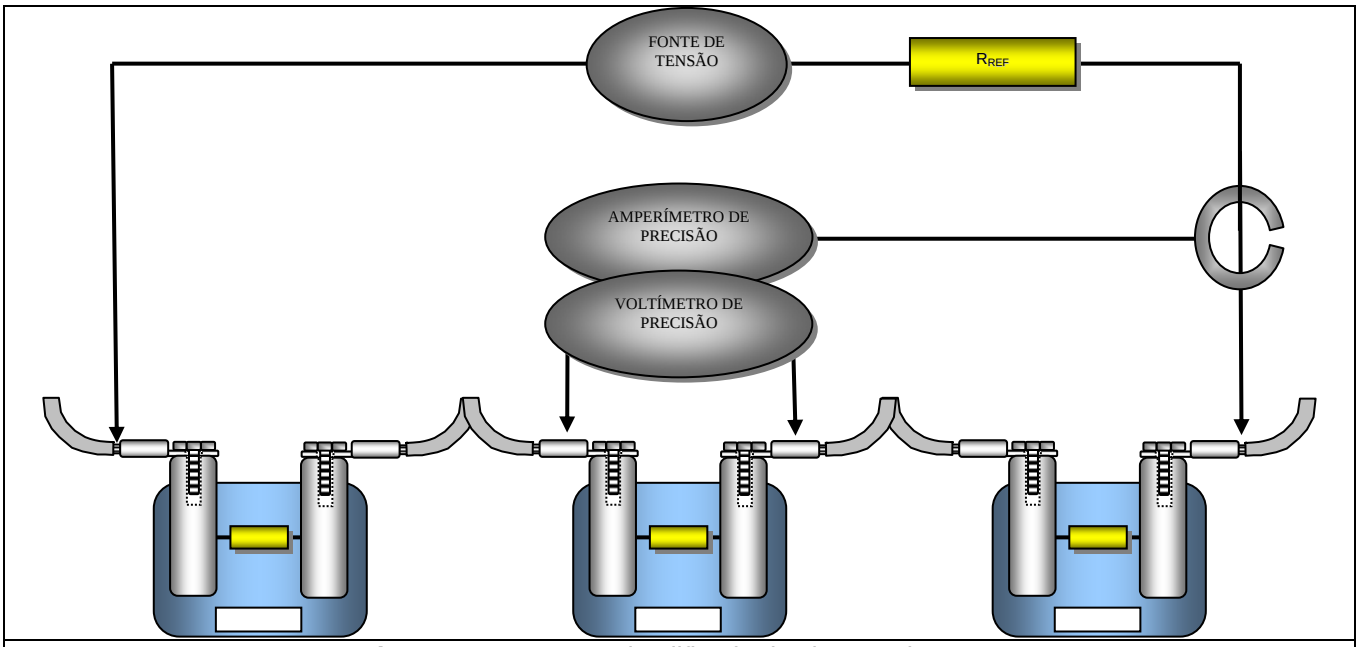


Figura 12 Esquema simplificado do sistema da AVO.

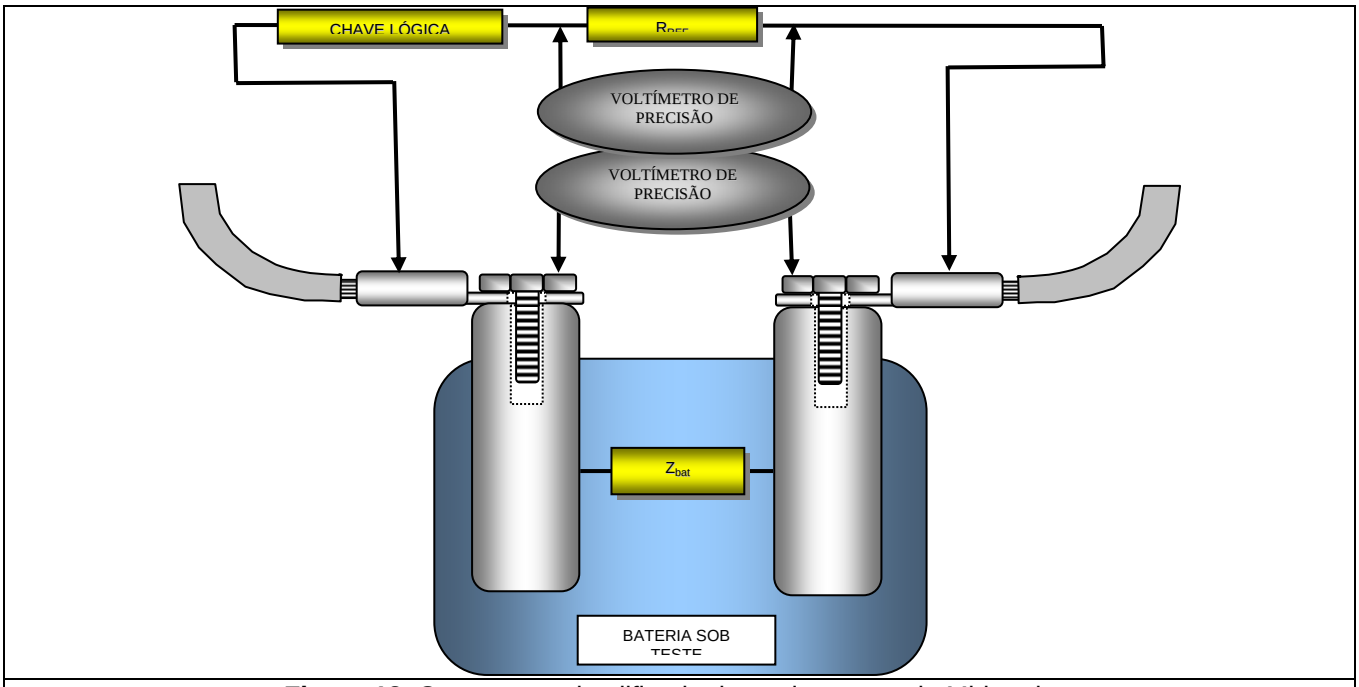


Figura 13 O esquema simplificado do equipamento da Midtronics.

VII. Conclusões com relação ao estado de acumuladores em função de suas impedâncias

Com os resultados mostrados neste trabalho, tanto as medidas no LIF como as medidas em Vila do Conde, conclui-se que a impedância do acumulador varia com a carga nele remanscente.

Essa conclusão nos arremete para o objetivo do projeto que é o aumento da confiabilidade operacional do banco de acumuladores. Já que com a medida da impedância podemos inferir na carga disponível no banco, estamos assim confirmando a operacionabilidade dos bancos em responder a uma solicitação.

A relação entre a impedância e a carga é um resultado já esperado, pois alguns trabalhos em periódicos internacionais (vide Bibliografia) já previam este comportamento. Entretanto, uma comprovação adicional é sempre bom pois operadores em subestações e alguns fabricantes de baterias mais conservadores não parecem dar atenção a este tipo de dignóstico.

A medida de impedância não fornece somente a carga do acumulador mas também informa o “estado de saúde” dele. Por “estado de saúde” entende-se se o acumulador apresenta corrosão ou algum defeito interno, apesar de possuir carga. Um defeito deste tipo impediria o acumulador de fornecer a carga que dispõe devido à corrosão ou outro defeito como um mal contacto entre os elementos internos. Por indução, infere-se que qualquer defeito desse tipo aumentaria a resistência interna do acumulador e este aumento seria perceptível durante a medida de impedância com os instrumentos.

Por outro lado, cada acumulador tem sua própria impedância. E a impedância é tão sensível ao modo de fabricação que pode variar de modelo para modelo, de fabricante para fabricante e até duas baterias de mesmo modelo de um mesmo fabricante podem apresentar valores diferentes se forem de lotes diferentes. Assim, medindo-se apenas uma vez a impedância de uma bateria não se tem como saber se ela está boa ou ruim.

Para se saber se uma bateria está em condições de operação deve-se compara-la com ela mesma ao longo do tempo (*trend line*), ou com outras de um mesmo lote, ao longo do tempo de uso. Alguns autores preconizam que a variação de mais de 20% do valor inicial (quando do comissionamento) pode indicar deterioração do elemento sugerindo substituição.

Nas figuras 9 e 10 note que inicialmente as admitâncias sobem nas primeiras horas para depois descerem normalmente durante a descarga. A literatura não tem resposta para este comportamento. Aparentemente existe uma espécie de difusão da carga pelo eletrólito quando a corrente inverte. A bateria estava em flutuação (carga) quando foi medida pela primeira vez (primeiro ponto dos gráficos) e de repente foi colocada em uso invertendo-se assim a corrente. Nesta hora foi feita uma nova medida de impedância. Então as baterias aparentam ter menos carga durante o estado em que estão em "flutuação". Esta foi a hora em que primeiramente medimos o banco. Depois, quando a corrente inverte de sentido, a carga aparece maior.

O que ficou ainda sem explicação foi o fato dos aparelhos comerciais terem sido “enganados” aparentando lerem uma carga menor do que as baterias re-

almente tinham. Por outro lado, o protótipo do LIF, o P-04, aparentemente mediu certo conforme pode ser visto nos gráficos das figuras 9 e 10. Note também que o P-04 não apresentou esse efeito quando mediu pela primeira vez o banco de baterias em laboratório, mostrado na Figura 5.

Certamente a diferença entre os comportamentos dos equipamentos deve-se às diferentes estratégias de medida e características elétricas tais como impedância de saída, frequência, processamento do sinal, filtragem etc, aliados ao conjunto baterias-retificador. Note-se que a impedância total medida antes da descarga incluía a impedância do retificador em paralelo e quando em descarga incluía a impedância da carga em paralelo (esta desprezível pois é muito grande frente à impedância dos acumuladores). Entretanto, como não se conhecem as características dos equipamentos comerciais não há como inferir de pronto uma resposta.

VIII. Agradecimentos

Os trabalhos realizados neste artigo contaram com a colaboração de diversas pessoas que participaram direta ou indiretamente deste projeto, sem ajuda das quais não teríamos chegado ao bom termo da pesquisa. Esta colaboração veio da Eletronorte da equipe do LIF.

Eng^{o}. Francisco Roberto Reis França, gerente do projeto na Eletronorte, cujo apoio, idéias, sugestões e críticas foram cruciais para o desenvolvimento do projeto. Ele esteve sempre presente, acompanhando o desenrolar do projeto durante todo seu curso.

Eng^{os}. Paulo Braga e **Marcos Lage**, técnicos da Eletronorte, participaram do projeto na fase de medidas. Sua ajuda foi de suma importância durante aquela fase. São profissionais extremamente dedicados, especialistas no assunto de acumuladores. Seus conhecimentos e ensinamentos em técnicas de medidas e manutenção de acumuladores alargaram grandemente nosso universo no assunto.

Eng^{o}. Luiz Cláudio Frade e sua equipe na Divisão de P&D da Eletronorte: **Renata, Marilan, Raineri, Alfredo** e outros que nos apoiaram administrativamente todo o tempo de duração do projeto, sempre nos recebendo da melhor maneira possível em Brasília e provendo uma interface transparente e sem burocracias entre o LIF e a Eletronorte.

À **Equipe do LIF**, sempre apoiando-nos em todas as necessidades, participando de reuniões técnicas oferecendo-nos um misto de conhecimentos e companheirismo, ingredientes mínimos necessários de uma equipe de P&D.

A todos eles, os autores agradecem.

IX. Bibliografia

Markle, G.J. AC Impedance testing for valve regulated cells. Telecomm. Energy Conf., pp 212-217, INTELEC 92, 4-8 October 1992.

Tenno, A. et al. Battery impedance and its relationship to battery characteristics. Telecomm. Energy Conf. 2002, Intelec 24th Annual International, pp 179-183, 29 Sep-3rd October, 2002.

Langan, P.E. The art of impedance testing. Cement Industry Technical Conference, pp 121-128, 11th -15th April 1999.

Hawkins, J.M. and Hand, R.H. AC impedance spectra of field-aged VRLA batteries. Telecomm. Energy Conf., pp 640-645, INTELEC 96, 6-10 October 1996.