



GSE/009

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

**GRUPO VIII
SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – GSE**

**PADRONIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO – ÊNFASE NA
APLICAÇÃO DE RELIGADORES PARA MANOBRA E PROTEÇÃO**

Eduardo N. Carvalho

Luiz Henrique S. Duarte*

Magda R. Nascimento

CEMIG

RESUMO

Após a CEMIG ter experimentado diversos tipos de falhas em bancos de capacitores de 13,8kV em subestações de distribuição, foram analisadas e implementadas inúmeras melhorias e modificações nos componentes, estruturas e configuração desses bancos, culminando com o desenvolvimento de um padrão com desempenho teoricamente superior aos anteriormente aplicados.

Esse artigo cita os principais padrões de bancos de capacitores, apresenta o histórico operativo dos mesmos, e finaliza com o padrão atualmente utilizado.

A ênfase do artigo está na descrição da investigação teórica e através da realização de ensaios para a aplicação de religadores como equipamento de manobra e proteção.

Após a conclusão, com sucesso, dessa investigação, vários religadores foram instalados ao longo dos últimos 3 anos.

O desempenho dos bancos de capacitores, incluindo os religadores, tem sido satisfatório, ratificando as vantagens teóricas idealizadas para o padrão atual.

PALAVRAS-CHAVE

Subestações, banco de capacitores, religadores, manobra capacitiva.

1.0 - INTRODUÇÃO

O desempenho insatisfatório de bancos de capacitores instalados em barramentos de 13,8 kV, acarretando um significativo impacto negativo nos índices de DEC e FEC, levou à CEMIG a desenvolver um novo projeto padrão completo, abrangendo a especificação dos equipamentos principais, bem como, a topologia, o

esquema de proteção, o arranjo eletromecânico, etc.. Dentre os diversos itens especificados, destaca-se a aplicação de religadores automáticos como equipamento de manobra, ao invés dos tradicionais disjuntores ou chaves interruptoras a vácuo ou a óleo.

Para estudo e busca de solução dos problemas foi formada uma equipe multidisciplinar, composta com especialistas das áreas de planejamento, projeto, operação e manutenção. Essa equipe teve como diretrizes apresentar uma solução imediata para a melhoria e desempenho dos bancos de capacitores em operação e também apresentar uma proposta de um novo padrão de banco para aplicações futuras.

Esse novo padrão foi concebido considerando a necessidade de atender a compensação reativa capacitiva do sistema CEMIG buscando-se a melhor relação custo/benefício, custos de instalação compatíveis, e custo reduzido ao longo da vida útil.

Todos os componentes dos bancos de capacitores, bem como a interação entre eles, foram analisados de maneira pormenorizada, implicando a alteração de escopo e especificações.

Entretanto, o maior desafio foi desenvolver o novo padrão com a utilização de um equipamento de manobra que reunisse as vantagens dos equipamentos convencionais, chaves a óleo/vácuo e disjuntores.

A proposta final foi a adoção do religador como equipamento de manobra e proteção do vão de banco de capacitores. Essa proposta foi validada através de uma extensa investigação teórica e prática, incluindo principalmente simulações digitais e ensaios específicos que comprovassem a sua compatibilidade para a aplicação pretendida. Destaca-se o desenvolvimento conjunto entre a CEMIG e o fabricante do religador.

2.0 - HISTÓRICO

A aplicação de bancos de capacitores na CEMIG sempre foi baseada em projetos padronizados. Tal procedimento apresenta diversas vantagens para a empresa considerando os aspectos de planejamento, projeto, aquisição de equipamentos, montagem, operação e manutenção.

Até o final da década de 80 foi adotado o padrão de bancos de capacitores conforme Figura 1 - (a). A partir dessa época e até meados da década de 90 foi padronizado um novo tipo de banco conforme Figura 1- (b). Os padrões mostrados na Figura 1 eram aplicados em barramentos de 13,8kV das subestações convencionais com até 4 bancos.

TABELA 1 – Características básicas dos bancos de capacitores

Características	Figura 1- (a)	Figura 1- (b)
Potência	1,2 a 2,4Mvar	1,2 a 3,0Mvar
Unidade Capacitiva	7960V – 100kvar	7960V – 100kvar
Proteção Capacitor	Fusível Externo	Fusível Externo
Ligação	Estrela Isolada	Estrela Isolada
Instalação	Barramento 13,8kV	Barramento 13,8kV
Evolução Módulos	300kvar	300kvar
Equip. Manobra	Chave a Óleo Monop.	Chave a Óleo Monop.
Proteção Geral	Chave Fusível	Disjuntor Geral
Proteção do Banco	TP e Relé 59	Trafo Dist. e Relé 59



FIGURA 1 – Diagramas unifilares simplificados

O padrão de banco conforme Figura 1 – (b) possui potência nominal superior ao do banco da Figura 1 – (a), sendo constituídos basicamente com os mesmos componentes. Com a aplicação do banco da Figura 1 – (b), observou-se um significativo aumento de falhas em relação ao banco da Figura 1 – (a). Esse fato causou grande impacto negativo na CEMIG sendo necessário adotar medidas para solucionar os problemas.

3.0- ESTUDOS

Devido ao elevado número de ocorrências nas subestações de distribuição envolvendo bancos de capacitores, decidiu-se pela criação de um grupo multi-disciplinar para estudar causas e apresentar uma proposta de solução.

A primeira etapa consistiu da identificação dos problemas de maior ocorrência e relevância, destacando-se principalmente: queima em cascata de elos fusíveis das unidades capacitivas ou desempenho insatisfatório do conjunto fusível expulsão (cartucho, elo e mola), explosão de latas e explosão de chaves a óleo.

Como consequência dessas ocorrências, citam-se os seguintes fatos negativos:

- ↳ Aumento do DEC e FEC da CEMIG;
- ↳ Falta de credibilidade pelas áreas de operação para com os bancos de capacitores;
- ↳ Necessidade de mudanças na rotina de trabalho das equipes de operação e manutenção do sistema, com o estabelecimento de novos critérios de segurança.

Por se tratar de equipamento imprescindível à operação do sistema, foram implementadas medidas corretivas num primeiro momento e definida a necessidade de se criar um novo padrão de bancos de capacitores para projetos futuros.

As medidas corretivas visaram a continuidade operativa de forma satisfatória dos bancos existentes e a adequação do projeto padronizado (ver Figura1- (b)) para as aplicações imediatas ou a curto prazo. Estas medidas consistiram das seguintes alterações:

- ↳ substituição dos elos fusíveis do conjunto fusível expulsão de fabricação nacional por elos importados;
- ↳ conscientização em relação aos critérios de manutenção, com alteração da periodicidade de inspeções nos principais componentes do banco;
- ↳ utilização de unidades capacitivas com fusíveis internos;
- ↳ utilização de pára-raios de óxido de zinco (ZnO), 12kV, 10kA, do tipo polimérico, entre fase e neutro do banco;
- ↳ utilização de chaves com meio de extinção a vácuo;
- ↳ implementação de manobra automática com temporização de 5 (cinco) minutos para religamento;
- ↳ rearranjo do projeto eletromecânico do banco com aumento das distâncias elétricas “Fase-Fase” e “Fase-Terra” nas estruturas autoportantes das unidades capacitivas;
- ↳ melhoria dos processos para execução das conexões elétricas.

Estas modificações resultaram no padrão indicado na Figura 2 - (a).

Pode-se observar que esse padrão foi definido com diversas melhorias com o objetivo de minimizar as ocorrências até então verificadas. Justifica-se a adoção das melhorias pelos seguintes motivos, considerando-se a experiência com os bancos de capacitores da CEMIG:

- ↳ unidades capacitivas com fusíveis internos apresentam melhor desempenho operativo comparativamente com as unidades protegidas por conjunto fusível tipo expulsão;

- ☞ pára-raios de óxido de zinco em paralelo com as unidades capacitivas para limitação de sobretensões advindas das operações de abertura e fechamento;
- ☞ utilização de chaves a vácuo com desempenho teórico superior comparativamente com as chaves a óleo;
- ☞ aumento das distâncias elétricas das estruturas suportes para minimizar o número de interrupções provocados por curto-circuito devido à pequenos animais.

TABELA 2 – Características básicas dos bancos de capacitores

Características	Figura 2 - (a)	Figura 2 - (b)
Potência	3,6Mvar	2,4 a 6,0Mvar
Unidade Capacitiva	7960V – 400kvar	7960V – 400kvar
Proteção Capacitor	Fusível Interno	Fusível Interno
Ligação	Estrela Isolada	Dupla Estrela Isolada
Instalação	Barramento 13,8kV	Barramento 13,8kV
Evolução_Módulos	1200kvar	1200kvar
Equip. Manobra	Chave a Vácuo Monop.	Religador
Proteção Geral	Disjuntor Geral	Religador
Proteção do Banco	Trafo Dist. e Relé 59	TC com Relé Microprocessado

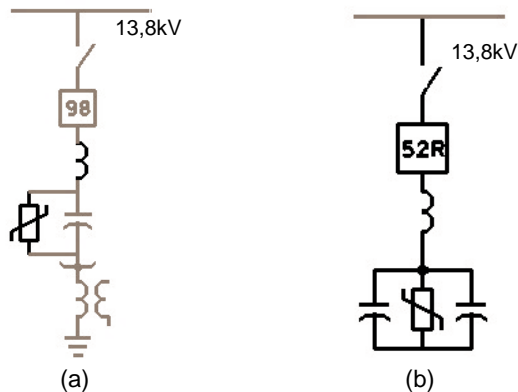


FIGURA 2 – Diagramas unifilares simplificados

O padrão conforme Figura 2 - (a) apresentou um desempenho operativo bastante superior ao padrão da Figura 1 - (b) mostrando-se eficaz para minimizar as ocorrências. Entretanto, a equipe de trabalho continuou ciente da necessidade de dar seqüência ao desenvolvimento dos estudos para obter um novo padrão que atendesse às expectativas de desempenho operativo requeridas pela CEMIG.

A conclusão dos estudos, principalmente devido à definição do equipamento de manobra a ser utilizado e também pelas observações obtidas durante a realização dos ensaios, conforme será descrito mais detalhadamente no item seguinte, possibilitou a concepção do padrão da Figura 2 - (b).

4.0 – AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MANOBRA

Como antecipado, a definição do equipamento de manobra mais adequado para os bancos de

capacitores seria a etapa final do desenvolvimento de um novo projeto padrão.

Esta avaliação iniciou-se com a análise do desempenho histórico dos bancos manobrados através de chaves com meio de interrupção a óleo e a vácuo. Diante do desempenho insatisfatório das chaves a óleo e da falta de dados e até dúvidas quanto ao desempenho das recém instaladas chaves a vácuo, decidiu-se por proceder ensaios específicos para um melhor conhecimento dos referidos equipamentos.

O ponto principal aferido foi a capacidade suportável para correntes de curta-duração e respectivos valores de crista. A norma ANSI pertinente sugere o valor eficaz de 4,5kA durante 1 segundo, o que é acatado pelos principais fornecedores. Portanto, o objetivo era confirmar a capacidade estabelecida pelos fabricantes, investigar sobre novas capacidades variando-se as grandezas corrente e tempo, e vislumbrar desempenhos acima do garantido para os projetos das chaves.

Foram ensaiados um modelo de chave a óleo e dois modelos diferentes de chave a vácuo, com os parâmetros e resultados apresentados resumidamente na Tabela 3.

TABELA 3 – Ensaios de corrente de curta duração em chaves a óleo e a vácuo.

Parâmetros ensaio ⇒	4,5kA em 1s	6kA em 0,5s	9kA em 1s
Equipamento			
Chave a óleo	Aprovado	Reprovado	Não realizado
Chave a vácuo "A"	Aprovado	Aprovado	Aprovado
Chave a vácuo "B"	Aprovado	Aprovado	Reprovado, falha após 0,6s

Os resultados indicaram que as chaves a vácuo podem ultrapassar a capacidade normalizada estabelecida pelos fabricantes. Entretanto, a obtenção da garantia deste desempenho mediante contratos de fornecimento exige um esforço maior envolvendo fabricante e usuário.

É importante ressaltar que a ênfase na investigação na capacidade de suportar correntes suportáveis passantes é devido à necessidade de adequar o padrão de bancos de capacitores às instalações de nível de curto-circuito de até 10kA, ou no mínimo 9kA, atendendo, dessa forma, todas as subestações de distribuição da CEMIG.

O possível sucesso na obtenção da majoração da característica investigada, associada a utilização de fusíveis de proteção para os vãos de capacitores, solucionaria duas questões desejadas pela equipe de estudo: a definição do equipamento de manobra, e a eliminação de faltas nos circuitos do banco de capacitores sem o desligamento do respectivo barramento.

Entretanto, pelo contexto apresentado, este caminho apresentou-se com uma complexidade e grau de risco

tais que inviabilizaram esta primeira alternativa, ou seja, a aplicação de chaves a vácuo para manobra do banco de capacitores em conjunto com fusíveis de potência para proteção contra curto-circuito.

Outra alternativa disponível seria a adoção de disjuntores para manobra e proteção do circuito do banco de capacitores. Essa opção traria outras vantagens agregadas, como a utilização de um só equipamento e a possibilidade de aumentar a faixa de potência nominal de bancos de capacitores a serem manobrados. Também, implicaria na especificação de um ensaio especial compatível com a aplicação pretendida, i.e., a manobra diária de bancos de capacitores de pequeno porte com as características elétricas particulares ao caso CEMIG. Entretanto, como desvantagem, esta solução requer custos adicionais com ensaios não normalizados, além do custo próprio elevado em relação às chaves a óleo/vácuo para manobra de bancos de capacitores.

Essa última análise, levou à reflexão sobre um equipamento de manobra que reunisse as vantagens obtidas com a aplicação de disjuntores, porém com custo reduzido, obtendo-se assim um valor final de kvar compatível. Estes requisitos almejados encorajaram a equipe CEMIG a avaliar a aplicação de religadores automáticos para a manobra de bancos de capacitores.

Este processo iniciou-se com o levantamento das características mínimas requeridas para a aplicação típica da CEMIG através de simulações digitais e análise do padrão de bancos de capacitores em desenvolvimento. Posteriormente, esses dados foram encaminhados a um tradicional fornecedor de religadores, acompanhados da proposta CEMIG para o desenvolvimento da aplicação pretendida.

O diagrama unifilar típico da aplicação em discussão é apresentado na Figura 3.

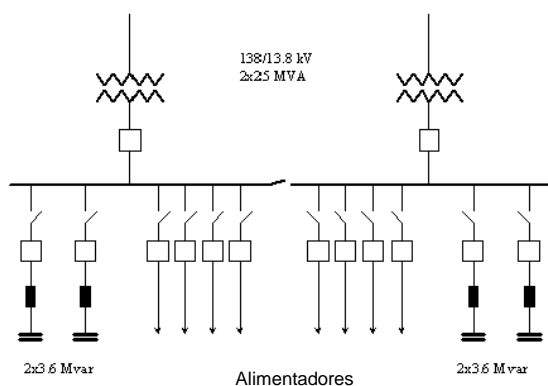


FIGURA 3 – Diagrama unifilar típico

A proposta de desenvolvimento dessa aplicação especial elaborada pela CEMIG incluiu:

- ↳ avaliação do fabricante focando a compatibilidade do religador com a aplicação desejada atendendo as características técnicas mínimas estabelecidas;
- ↳ resposta do fabricante quanto ao desempenho teórico esperado ao longo da vida útil do equipamento;
- ↳ realização de ensaios especiais previamente especificados para a comprovação desta compatibilidade;
- ↳ inspeção do equipamento após o término da realização dos ensaios especiais para a validação da proposta.

A assimilação da proposta CEMIG por parte do fabricante, a sua aceitação, bem como os acordos técnicos pormenorizados demandou alguns meses de negociação, e findou com o consenso de proceder uma primeira etapa de investigações práticas em laboratório brasileiro, com a participação de um pesquisador atuante nas atividades de desenvolvimento do equipamento.

Portanto, contratou-se a realização de um ensaio especial de manobra de corrente capacitiva junto ao CEPEL, para realização de 1200 operações com a utilização de religador. Para a realização do ensaio foi previsto um circuito elétrico equivalente à condição de fechamento do último banco de capacitores de 3,6Mvar da subestação, considerando-se três bancos já energizados. Assim sendo, além da corrente capacitiva a ser manobrada (200A - banco de 4,8Mvar), o religador seria também submetido à uma magnitude de corrente de energização equivalente à existente numa SE típica (ver Figura 3).

A seguir são descritos os aspectos mais importantes observados no desenvolvimento da primeira etapa deste ensaio.

Foram realizadas 1395 manobras: 1200 conforme previsto inicialmente, além de 105 adicionais nas mesmas condições de manobra e outras 90 com 280A. O ensaio foi conduzido sem qualquer anormalidade ou ocorrência de sobretensões que pudessem inferir falha de interrupção.

Após a conclusão desta etapa, a investigação foi considerada bem sucedida por ambas as partes, além do próprio CEPEL, e portanto, CEMIG e fabricante efetuaram várias discussões técnicas com os seguintes objetivos:

- ↳ acertar os procedimentos técnicos para a extensão das investigações práticas, e finalização do desenvolvimento da aplicação;
- ↳ particularmente, avaliar a possibilidade da aplicação do religador para manobras de bancos de capacitores de 13,8kV de potências compreendidas entre 2,4Mvar e 6,0Mvar, o que atenderia a totalidade das aplicações CEMIG para as subestações de distribuição.

O acordo final resultou na execução de outro ensaio especial de manobra capacitiva tomando-se como referência as seguintes características que seriam

posteriormente consideradas como nominais do religador para a aplicação em questão:

- ☞ corrente de manobra capacitiva nominal: 400A;
- ☞ corrente transitória de energização nominal: 12kA;
- ☞ frequência nominal da corrente de energização: 2kHz.

Desta forma, a segunda etapa da investigação prática consistiu de mais 1200 operações na mesma unidade ensaiada no CEPEL, sem qualquer procedimento de manutenção, como segue:

- ☞ 400 operações com 20% da corrente de manobra capacitiva nominal;
- ☞ 400 operações com 50% da corrente de manobra capacitiva nominal;
- ☞ 400 operações com 100% da corrente de manobra capacitiva nominal.

Durante esse ensaio, também não foi verificado qualquer tipo de anormalidade. Os valores de resistência de contatos foram medidos após o término de cada seqüência de 400 manobras, onde foram verificadas variações não representativas, compatíveis com o número de operações efetuadas.

Com a conclusão da segunda etapa do ensaio, foram totalizadas 2595 operações de estabelecimento e abertura de corrente capacitiva. Após essa etapa as câmaras a vácuo do religador foram avaliadas através de:

- ☞ utilização de técnica de raio X;
- ☞ tensão aplicada em corrente contínua;
- ☞ inspeção e análise visual de contatos após abertura das câmaras.

O desgaste dos contatos foi considerado baixo, donde concluiu-se que a vida útil estimada para o religador neste tipo de aplicação estaria principalmente relacionada com a sua durabilidade mecânica (ver Figura 4).

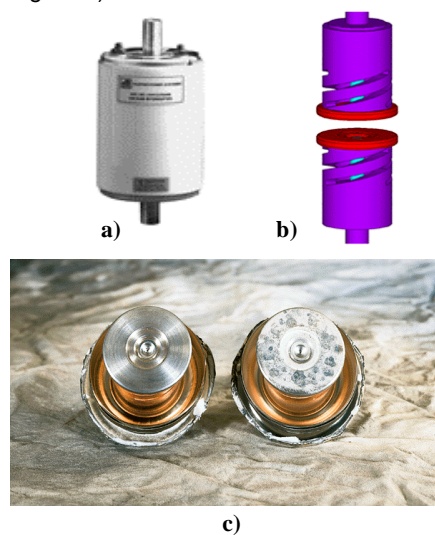


FIGURA 4 – (a) câmara a vácuo – (b) conjunto de contatos principais – (c) contatos novos e após 2595 manobras capacitivas

Após estas atividades, a proposta de desenvolvimento feita pela CEMIG e acordada com o fabricante foi considerada finalizada.

As investigações relatadas subsidiaram a elaboração de uma especificação técnica adequada para utilização em aquisições, definindo os requisitos técnicos para a aplicação de religadores automáticos para manobra de bancos de capacitores em subestações de distribuição da CEMIG.

Esse documento inclui a especificação de um ensaio especial para comprovar o desempenho do religador na aplicação em questão, estabelecendo:

- ☞ critérios orientativos para a montagem do circuito de ensaio;
- ☞ critérios de execução do ensaio;
- ☞ critérios de desempenho e de inspeção para decidir sobre a aprovação do equipamento ensaiado.

5.0 – EXPERIÊNCIA DE CAMPO

As atividades descritas nos itens anteriores permitiram à CEMIG instalar 9 bancos de capacitores de 3,6 a 6Mvar no novo padrão (ver Figura 2 – (b)), manobrados por religadores, em meados de 1998.

Entre 1999 e 2000, foram instalados 105 religadores em bancos de capacitores novos ou existentes de 2,4 a 6Mvar, sendo neste caso a prática de substituição de chaves a óleo. Está prevista a aplicação de mais 25 unidades até o final de 2001.

Portanto, desde 1998 a CEMIG tem adquirido com sucesso religadores para manobras capacitivas, bem como os demais componentes do novo padrão de bancos de capacitores.

O desempenho dos equipamentos instalados tem sido totalmente satisfatório nestes 3 primeiros anos. Os bancos de capacitores do sistema de distribuição da CEMIG operam em média entre uma a duas vezes por dia, resultando em, pelo menos, 20.000 operações acumuladas até o momento, sem qualquer registro de falha.

Vale ressaltar que a implementação do atual padrão de banco de capacitores foi precedida de ampla e detalhada divulgação e treinamento aos diversos órgãos de operação e manutenção da CEMIG, focando os aspectos particulares da aplicação, ajustes, montagem e manutenção.

6.0 - CONCLUSÕES

O desenvolvimento do padrão de bancos de capacitores conforme Figura 2 – (b) para subestações de distribuição, com ênfase para a aplicação de religadores como equipamento de manobra capacitiva, abrangeu estudos e investigações práticas detalhadas: das necessidades do sistema elétrico, das configurações possíveis para bancos de capacitores, dos esquemas de proteção, do desempenho dos equipamentos e componentes, e principalmente, da necessária integração entre esses tópicos.

Deve-se enfatizar que uma investigação similar à descrita neste artigo deve ser necessariamente desenvolvida para a aplicação de religadores como proposto, a fim de se levar em conta as características específicas do sistema e do equipamento em questão.

Para a CEMIG, o padrão atual de bancos de capacitores apresentou-se como solução de problemas históricos, principalmente envolvendo falhas operativas. As vantagens teóricas discutidas nos itens 2.0 e 3.0 deste artigo, foram confirmadas através da experiência de campo. Entre essas vantagens, destaca-se a redução dos índices DEC/FEC, a dupla função de manobra e proteção contra curto-circuitos, e a redução de intervenções corretivas.

Ainda, o custo inicial obtido é compatível com a potência reativa instalada, e o custo final por kvar é menor para o padrão atual, se comparado com os padrões anteriormente adotados.

A especificação técnica e o processo de aquisição adotados pela CEMIG, incluindo a possível realização de ensaios de tipo e/ou especial, demonstraram-se adequados e eficazes sob os aspectos técnico-comerciais.

Por fim, o novo e atual padrão de banco de capacitores veio contribuir para a eficácia na busca de sistemas elétricos otimizados e de qualidade, ou, em outras palavras, para fazer cumprir, na prática, as metas de planejamento de sistemas.

7.0 – BIBLIOGRAFIA

(1) Araújo, M.C.R., Campos, W.A., Carvalho, E.N., Duarte, L.H.S., Nascimento, M.R., Santiago, A.O.B., Bancos de capacitores em derivação no sistema CEMIG – 1997.

(2) Mello, C.A.F., Nascimento, M.R., Utilização de pára-raios de ZnO para redução das sobretensões em bancos de capacitores de 13,8kV – 1995.

(3) Kojovic, L.A., Peraza J., Falcão, N.S., Campos, W.A., Carvalho, E.N., Duarte, L.H.S., Nascimento, M.R., Costa, E.S., Burd, H., Application of three-phase vacuum reclosers for capacitor switching – 2001.

(4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Capacitores de potência em derivação para sistemas de tensão nominal acima de 1000 V – NBR 5282. Brasil.

(5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Guia para instalação e operação de capacitores de potência – NBR 5060. Brasil.

(6) AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Standard guide for the application, operation, and maintenance of automatic circuit reclosers – C37.61-1973.

8.0 – DADOS BIOGRÁFICOS

Eduardo Nunes e Carvalho nasceu em Pitangui – Brasil em 1962. Graduado em engenharia elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais no ano de 1986. Desde 1987 trabalha no departamento de projeto de subestações da CEMIG com atividades de engenharia e gestão técnica de equipamentos de subestações.

Luiz Henrique Silva Duarte nasceu em Belo Horizonte – Brasil em 1967. Graduado e mestre em engenharia elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais em 1995 e 2000, respectivamente. Desde 1986, trabalha na CEMIG com as atividades principais de engenharia e gestão técnica de equipamentos para subestações, bem como, a coordenação de empreendimentos de T&D.

Magda de Rezende Nascimento nasceu em Três Corações - Brasil em 1953. Graduada pela Universidade Federal de Juiz de Fora no ano de 1976. Desde 1977 trabalha no departamento de planejamento da transmissão da CEMIG onde é responsável por especificações de equipamentos e estudos de transitórios em sistemas elétricos, além de atuar na área de estudos e definições de filosofias de proteção e configurações de subestações.