



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 de Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

**CHAVE SECCIONADORA MÓVEL DE 500 KV COM ACIONAMENTO REMOTO MONTADA
EM ANDAIME ISOLANTE PARA MANUTENÇÃO EM TPC E PÁRA-RAIOS**

**Geraldo Magela Gontijo(*)
CEMIG**

**Tiago Santana Rodrigues
RITZ**

**Edivaldo Moreira Franco
CEMIG**

RESUMO

O trabalho apresenta todas as etapas de uma chave seccionadora móvel de 500 kV montada em andaime isolante de linha viva e com acionamento remoto. A chave possibilita a conexão e desconexão de pára-raios e TPC – Transformador de Potencial Capacitivo em terminais de Linhas de Transmissão – LT, sem necessidade de desligar os circuitos, mantendo a LT disponível, evitando as perdas de receita e execução dos trabalhos com segurança.

No artigo descreve-se a pesquisa e desenvolvimento nas suas etapas de estudo de soluções, concepção, definição de características básicas, projeto e o processo de desenvolvimento dos componentes. São discutidos os pontos críticos identificados no desenvolvimento: a velocidade de acionamento, tempo de abertura, capacidade de interrupção do arco e suportabilidade dielétrica com a chave aberta, bem como as soluções adotadas os ensaios funcionais e elétricos realizados para validação da chave como ferramenta indispensável às equipes de manutenção da transmissão, no contexto atual do setor elétrico brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE

Seccionadora móvel, Linha viva, Metodologia de manutenção, Parcela variável.

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente não é tecnicamente possível a execução de manutenção ou a substituição de pára-raios e TPC em subestações de 230 a 500 kV, sem a o desligamento do circuito, e em especial dos terminais de LT onde a maioria destes equipamentos estão aplicados. As subestações desta faixa de tensão pertencem à rede básica do Sistema Elétrico, onde o desligamento ou indisponibilidade de equipamentos que provoquem perda de função implicam em perda de receita para as transmissoras. Este fato motivou o desenvolvimento de uma chave seccionadora móvel com acionamento remoto, montada em um andaime modular isolante, que associada a técnicas de Linha Viva – LV possibilita a manutenção destes equipamentos sem o desligamento da LT e sem perda de receita na parcela variável - PV.

Esta chave foi desenvolvida através de um projeto de P&D – Pesquisa e Desenvolvimento, aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL em parceria entre as empresas CEMIG – GT, RITZ, AREVA e a Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. O protótipo foi submetido a ensaios dielétricos e funcionais no Laboratório de Alta Tensão da UFMG – LEAT e disponibilizada para utilização pela equipes de manutenção em trabalhos em subestações de transmissão de tensões de 230 a 500 kV. Atualmente está em fase de

experimentação pelas equipes, para subsidiar melhorias no dispositivo e a elaboração e padronização de instrução de utilização.

2.0 - MOTIVADORES DO PROJETO

A motivação para desenvolver a chave móvel veio da dificuldade de se desligar LTs da Rede Básica, seja por perda de receita, seja por comprometimento da confiabilidade do sistema elétrico; descritas nos itens seguintes.

2.1 Regulamentação do setor elétrico

As subestações de transmissão de 230 a 500kV da CEMIG fazem parte da Rede Básica de Transmissão do ONS – Operador Nacional do Sistema. As transmissoras disponibilizam suas instalações para a Rede Básica pelo que recebem a RAP – receita anual permitida. Esta RAP tem uma parcela variável - PV que é descontada para cada indisponibilização de função.

No caso dos terminais de LT, a indisponibilidade, programada ou não, provoca a perda da função LT e consequentemente o desconto da parcela variável da transmissora, conforme o tempo de indisponibilidade e a característica do desligamento, limitada no ano a 25% do valor da RAP. Para a maioria das LTs o custo de indisponibilidade para intervenções (manutenções preventivas ou corretivas) é elevado, forçando naturalmente a uma estratégia de manutenção com o um tempo mínimo possível de indisponibilidade.

Neste contexto se inserem os equipamentos de terminais de LT, TPC e pára-raios, pois sua indisponibilidade provoca também a indisponibilidade da LT.

2.2 Confiabilidade do Sistema Elétrico

Alguns pontos operativos das subestações de transmissão afetam sobremaneira a confiabilidade e a estabilidade do sistema elétrico, o que tornam difícil o desligamento das LT. Dentre as principais dificuldades podemos destacar as linhas radiais que alimentam consumidores industriais, ou interligações entre subestações cuja saída provoque em primeira contingência, degradação da qualidade da energia e ou perda da confiabilidade; seja por violação de limites de operação ou perda da flexibilidade operativa.

Para viabilizar a manutenção em equipamentos de tais pontos operativos é necessário programar desligamentos em fins de semana ou negociar cortes de carga com consumidores, além de ter análise de contingência para uma eventual ocorrência durante este período de indisponibilidade.

Em face do acima exposto a manutenção nos TPC e pára-raios de terminais de LT é dificultada, ora pela perda de receita – PV ora pela confiabilidade do sistema elétrico. Não é raro a coincidência das duas condições, uma vez que as LT mais importantes e estratégicas tem maior RAP.

Assim é de grande interesse e justificada motivação o desenvolvimento de um dispositivo que possibilite a manutenção nestes equipamentos (TPC e pára-raios) sem o desligamento dos terminais das LT ou dos circuitos a que estejam ligados.

3.0 - DESENVOLVIMENTO

Dentro do programa de projetos de pesquisa e desenvolvimento – P&D da ANEEL, vislumbrou-se a oportunidade do desenvolvimento de uma chave móvel, com acionamento remoto que possibilitasse a conexão e desconexão de TPC e pára-raios dos terminais de LT (ou outros circuitos) sem que houvesse a necessidade de desligar o circuito. Uma vez aprovado pela ANEEL o projeto passou ser desenvolvido.

3.1 Características desejadas

As características desejadas para a chave inicialmente foram:

- a) Um chave montada numa estrutura isolante para trabalhar na faixa de tensão de 230 a 500 kV, e que possa ser montada e movimentada no espaço do arranjo entre fase dos terminais de LT;
- b) Ser compacta e de fácil montagem no páteo das subestações;
- c) Interromper as correntes tipicamente capacitivas de TPC e pára-raios;
- d) Manobrar no plano vertical para não reduzir as distâncias de segurança entre partes energizadas;
- e) Ter o mecanismo robusto e confiável;
- f) Fechar firmemente os contatos;

- g) Ter comando remoto para ser comandada a distância e garantir a segurança do operador.

A figura 1 mostra uma concepção inicial desenvolvida em software de “CAD” tridimensional.

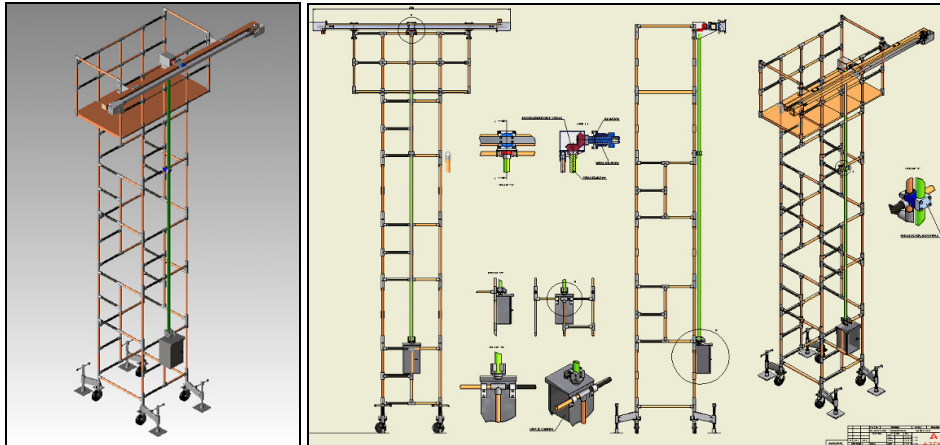


Figura 1 – Projeto inicial da chave em desenho tridimensional e detalhamento de componentes

3.2 Pontos críticos

Na fase de concepção e durante a fabricação do protótipo foram sendo identificados os pontos críticos e que requeriam maior atenção. Estes pontos críticos são apresentados e discutidos em termos dos seus efeitos, porém a solução de projeto para cada um deles são apresentadas no item 3.3 – Soluções adotadas.

Peso da chave:

O peso da chave foi a característica que demandou maior trabalho no desenvolvimento,

O peso máximo suportável no centro do andaime isolante, valor característico para o andaime de 1m x 1m é de 300 kg. Durante a montagem identificou-se que o peso excessivo do conjunto chave e suporte, no topo e concentrado num mesmo lado provocou uma flexão no andaime e um desalinhamento estrutural entre o eixo de acionamento da chave e a haste isolante de acionamento vertical. Esta situação pode ser visualizada na figura 2.

Outra consequência do peso da chave é a dificuldade de elevação e montagem da mesma pelos eletricitistas; e o aumento do risco de acidentes durante a montagem. Paralelamente à redução do peso foi estudada a colocação de dispositivos de içamento para facilitar o trabalho de subida e descida da chave. A montagem do motor com caixa de redução do mesmo lado agravou o desalinhamento entre a chave e o acionamento vertical.



Figura 2 – Desalinhamento do acionamento devido ao excesso de peso da chave

Velocidade e estabilidade de operação:

A velocidade da chave não deveria ser muito elevada para não provocar vibrações e instabilidade nas manobras. A solução inicial de um mecanismo convencional, típico de seccionadoras motorizadas, asseguraria a estabilidade e uma operação firme da chave, porém, implicaria em tempos elevados de operação, particularmente na abertura onde haveria necessidade de tempos muito curtos para facilitar a extinção do arco. A caixa de redução utilizada trouxe dois efeitos: um negativo pelo excesso de peso, deformando a estrutura; e um efeito positivo um fechamento firme e suave da chave assegurando tempos curtos de fechamento. A velocidade da chave foi a característica que demandou maior trabalho no desenvolvimento.

Tempo de operação e interrupção do arco:

O tempo de operação deveria ser o menor possível, desde que garantida a estabilidade durante a manobra. Um tempo menor é altamente desejável para garantir extinção do arco entre a lâmina e os contatos fixos da chave. Havia a necessidade de uma solução de compromisso entre velocidade e estabilidade para garantir o menor tempo possível.

A interrupção da corrente depende também de características geométricas do suporte da chave, da característica do material isolante do suporte e da impedância do TPC e pára-raios contrapondo-se a impedância do sistema no momento da abertura, conforme [1 e 2]. A avaliação teórica da capacidade de interrupção da corrente através de, modelagem de arco para se chegar ao tempo máximo de abertura, foi descartada por exigir modelagem complexa. Como pode ser visto na figura 3 a barra isolante de sustentação da chave possuía partes metálicas intercaladas ao longo de seu comprimento, o que poderia facilitar a criação de caminhos de disrupção e dificultar a extinção do arco durante sua abertura.

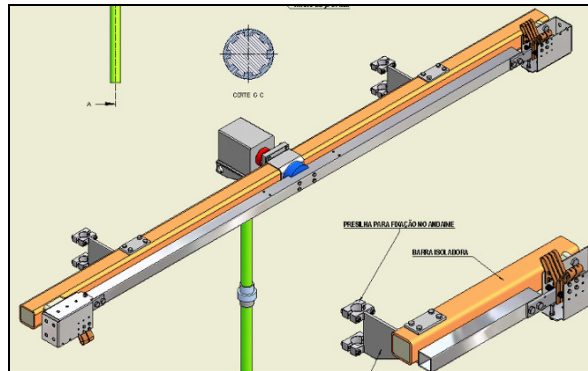


Figura 3 – Partes metálicas no centro e próximas da extremidade na barra isolante

Suportabilidade dielétrica:

Da mesma forma que prejudicaria a interrupção da corrente, as partes metálicas ao longo da barra isolante de sustentação da chave poderiam comprometer a suportabilidade dielétrica havendo o risco de não suportar a tensão de frequência industrial aplicada aos terminais da chave aberta. Haveria, também, o risco de ocorrer distribuições não uniformes de campo elétrico, criando pontos críticos de deformação da distribuição de campos que iniciassem um processo de disrupção.

3.3 Soluções adotadas

Os pontos críticos descritos no ítem anterior e outros problemas identificados foram estudados e diagnosticados na montagem da primeira versão do protótipo. São descritos a seguir para cada um dos componentes a solução de projeto, que no conjunto final resultou numa chave móvel com desempenho satisfatório e efetiva para atender as características inicialmente desejadas.

Isolamento :

A estrutura do andaime garantiu um bom isolamento para a terra. A situação mais crítica a resolver era a suportabilidade entre os contatos. O tubo isolante de suporte da chave tem um isolamento típico de 100 kV/30 cm. O valor é de tensão rms suportável de 60 Hz. A chave aberta suportou uma tensão entre terminais de 720 kV rms.

Interrupção da corrente :

O tempo médio de operação da chave medido é de 1,6 segundos. A situação mais crítica a resolver era a suportabilidade entre os contatos durante a desenergização simultânea de um pára-raios e um TPC de 500 kV. Nesta manobra há formação de dois arcos simultâneos em cada extremidade da lâmina e os contatos fixos. Esta situação é ilustrada na figura 4.

Seccionadora :

A lâmina da chave usa um perfil quadrado de alumínio com extremidade de cobre prateado com peso muito reduzido. Para os contatos fixos são usados lâminas de contato pressionadas por mola garantindo uma boa pressão e um contato firme entre lâmina e contatos fixos. Este conjunto faz parte de contatos da linha de seccionadoras da AREVA, com capacidade de corrente nominal de 1200 A e corrente de curto de 20 kA. Evidentemente a característica de curto-circuito não pode ser replicada para o protótipo em questão, porém sob condições controladas do tempo de atuação da proteção em caso de curto passante a chave pode ser aplicada como *bypass* temporário para manutenção em outras seccionadoras. Esta é uma característica adicional que precisa ser melhor avaliada na fase de experimentação e planejamento da tarefa.

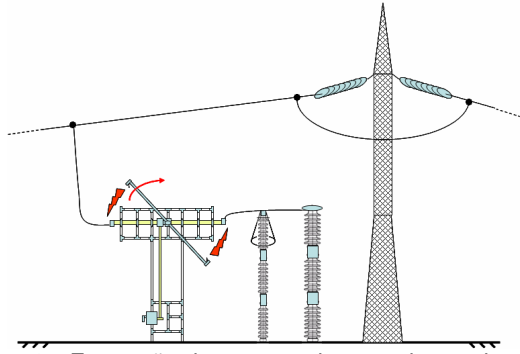


Figura 4 – Formação de arco na abertura da seccionadora

Os tempos típicos (sistema CEMIG) de atuação da proteção são de até 100 ms, porém para proteção secundária e retaguarda pode chegar até 200ms.

A seccionadora é montada na haste isolante na fábrica e não requer regulagens no campo durante a montagem do conjunto andaime isolante e chave.

A figura 5 apresenta a chave montada no andaime.



Figura 5 – Chave seccionadora montada no andaime

Para reduzir significativamente o peso da chave, foi substituída a barra isolante de perfil por uma outra de perfil tubular com a metade do peso anterior utilizada na primeira versão do protótipo. As partes metálicas mais pesadas como eixo de acionamento e engrenagens, na primeira versão em aço foram substituídas por alumínio fundido. A figura 6 ilustra a barra redonda utilizada.



Figura 6 – Barra isolante tubular e contatos fixos

Mecanismo :

A solução adotada foi um mecanismo com caixa de redução e motor acoplado. O motor é alimentado por tensão trifásica 220 Vca, porém este motor deve ser substituído por um de 127 Vca para maior flexibilidade de utilização.



Figura 7 - Mecanismo com caixa de redução e a alavanca de acionamento manual

O comando remoto requereu um cabo blindado para proteção contra os surtos advindos do arco na manobra. Caso haja falha do motor ou do comando elétrico, o mecanismo pode ser aberto manualmente através de alavanca acoplada ao motor. A figura 7 mostra o mecanismo com caixa de redução e a alavanca de acionamento manual.

O comando elétrico foi montado em uma caixa com os botões *FECHAR*, *ABRIR* e *PARAR*. A figura 8 mostra o comando elétrico do motoredutor.



Figura 8 – Caixa de comando elétrico da chave

Acionamentos :

A haste isolante é acoplada entre a caixa de redução e a caixa de engrenagens cônicas que transfere movimento para a chave seccionadora. O eixo da engrenagem cônica na chave é encaixado em um rolamento para suavizar o acionamento e reduzir o atrito.

Foram introduzidos pontos de compensação para evitar sobre-esforços na haste vertical de acionamento, como: acoplamento articulado, folga (rasgo) no varão de acionamento permitindo uma compensação no sentido vertical. Para possibilitar a montagem de diferentes alturas do andaime possibilitando trabalhar numa altura adequada a altura dos equipamentos no arranjo, são disponibilizados dois tamanhos de varão: 4 m e 5 m; que podem ser utilizados separadamente e em série, quando a máxima altura do conjunto é obtida: 10,6 m. Por ora a chave tem sido utilizada somente com varão (haste isolante) de 5 m, que confere uma altura total ao conjunto de 6,6 m.

As figuras 9 e 10 ilustram as pontos mais importantes do acionamento.



Figura 9 – Acoplamento moto-reductor haste isolante e chaves de fim de curso

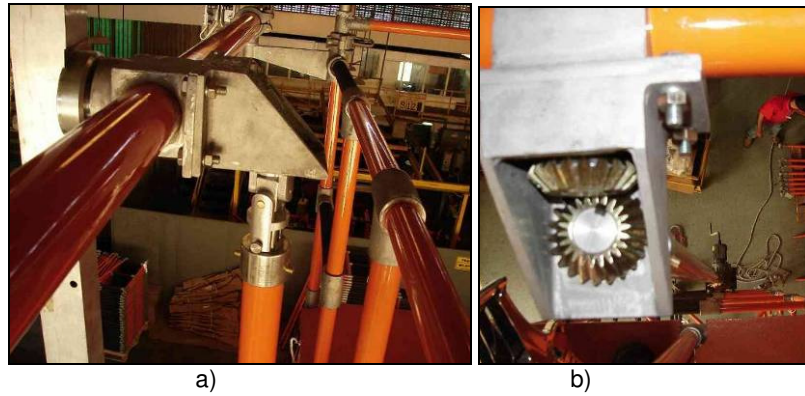


Figura 10 – a) Acoplamento articulado do eixo e b) Caixa de redução com engrenagens cônicas

O acoplamento articulado, mostrado na figura 10, permite a compensação de tensões, aliviando esforços sobre o varão e facilitando o encaixe com a caixa de redução, agilizando o trabalho de montagem do conjunto feito no campo. As engrenagens cônicas fazem a translação do movimento de vertical para horizontal.

3.4 Ensaios

O ensaio mais importante é o de extinção do arco formado na abertura da chave desenergizando o TPC e o pára-raios. O arranjo proposto para este ensaio, adaptado de [2] e proposto por [1 e 3] é apresentado na figura 11.

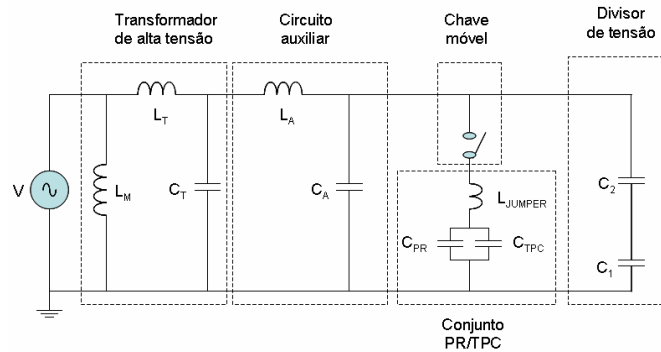


Figura 11 – Circuito proposto para o ensaio de extinção do arco

Os ensaios foram para as seguintes condições:

$$\begin{aligned} C_S/C_L &= 0,1; \\ C_S/C_L &= 1,0; \\ C_S/C_L &= 2,0. \end{aligned}$$

Onde (vide figura 11):

$$C_L = (C_{TPC} + C_{PR}) \rightarrow C_L = 5,1 \text{ nF};$$

$$C_S = (C_A + C_2) \rightarrow C_S = 510 \text{ pF}; C_S = 5,1 \text{ nF} \text{ e } C_S = 10,2 \text{ nF}.$$

Os demais ensaios propostos [3] e realizados, são relacionados abaixo. Como a chave poderá operar para tensões de até 550 kV, os ensaios foram realizados para esta classe de tensão.

- ✓ tensão suportável de impulso atmosférico;
 - chave aberta (entre contatos) – 1050 kV;
 - chave fechada (lâmina-terra) – 1050 kV;
- ✓ tensão suportável de manobra a seco;
 - chave aberta (entre contatos) – 900 kV;
 - chave fechada (lâmina-terra) – 1050 kV;
- ✓ tensão suportável de 60 Hz;
 - a seco (entre contatos) – 720 kV;
 - a seco (lâmina-terra) – 900 kV;
- ✓ durabilidade mecânica – 250 operações sem mau funcionamento;

- ✓ medição da resistência ôhmica (chave fechada);
- ✓ medição da resistência de isolamento;
- ✓ tensão disruptiva de impulso atmosférico;
- ✓ tensão disruptiva de 60 Hz;

4.0 - CONCLUSÕES

- ✓ As soluções adotadas no desenvolvimento do protótipo permitiram construir uma chave com boas características elétricas e funcionalidade mecânica.
- ✓ Ao longo do projeto identificou-se uma aplicação adicional ao que foi inicialmente concebido: sua utilização como *by-pass* para chaves que necessitem de manutenção corretiva, desde que observados os cuidados em caso de ocorrência de curto-circuito.
- ✓ A chave foi aprovada nos ensaios realizados e disponibilizada para uso pelas equipes de manutenção.
- ✓ Para realização dos trabalhos são envolvidas as equipes de manutenção de subestação e a equipe de serviços em linha viva em linhas de transmissão.
- ✓ A utilização da chave móvel requer supervisão dedicada, por envolver tarefas de risco de LV. Neste sentido é necessário uma análise prévia da viabilidade técnico/econômica de sua utilização, considerando a PV em questão, a complexidade do arranjo e a importância sistêmica daquele ponto operativo.
- ✓ É indispensável um planejamento prévio, com análise *in loco* do arranjo, e uma eficiente e detalhada análise de risco antes da execução do serviço.
- ✓ Para utilização plena de seus recursos a chave deve ser testada com ensaios de elevação de temperatura e corrente de curto circuito, ainda que seus contatos sejam dimensionados para corrente nominal de 1200 A e lcc(corrente de curto-circuito) de 20 kA.
- ✓ A chave vem sendo usada em fase experimental para validação e elaboração de instrução definitiva de utilização.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Saldanha, J.O; Boaventura W.C; Rel.01.09/2008-DEE.FCO.CEMIG/RITZ-24p Proposição de um arranjo e de um roteiro de testes a serem realizados no Laboratório de Alta Tensão da AREVA, nos protótipos de chave, para garantir a capacidade de abertura para correntes capacitivas típicas de sistemas de 230, 345 e 500 kV, setembro/2008
- [2] Peelo,D.F., Current Interruption Using High Voltage Air-Break Disconnectors. Tese de Doutorado. Technische Universiteit Eindhoven. Março de 2004
- [3] IEEE Guide to Current Interruption with Horn-Gap Air Switches. IEEE C37.36b-1190