

# Desenvolvimento de um Sistema de Acionamento de Disjuntores Visando a Menor Sobretenção

M. V. Garbelotti, TBE; J. A. Jardini; M. Masuda; R. P. Casolari; G. Y. Saiki, EPUSP/PEA/GAGTD<sup>1</sup>

**Resumo** – O chaveamento controlado de disjuntores tem se mostrado uma solução com desempenho altamente satisfatório para a redução de transitórios elétricos na rede quando da manobra de disjuntores. Este artigo trata da identificação dos melhores instantes de fechamento dos contatos dos disjuntores nas manobras de fechamento de transformadores e linhas de transmissão visando a especificação do sistema de acionamento. Também são especificadas as bases para o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico que permita a manobra (fechamento) sincronizada de disjuntores visando a menor sobretenção transitória no sistema.

**Palavras-chave** – ATP, Chaveamento Controlado, Disjuntor, Modelagem, Sobretenção.

## I. INTRODUÇÃO

O chaveamento controlado é usualmente utilizado como equipamento de controle eletrônico para facilitar a operação dos contatos do equipamento de chaveamento em um pré-determinado ponto em relação a um sinal elétrico de referência.

O monitoramento da abertura se refere à técnica de controle da separação do contato de cada pólo do disjuntor em relação ao ângulo da fase da corrente e portanto controlando o tempo de arco de forma a minimizar as solicitações nos componentes do sistema de potência.

Analogamente essas solicitações podem ser minimizadas pelo uso do chaveamento controlado para monitorar o instante do fechamento em relação à forma de onda da tensão do sistema.

Esses controladores são utilizados para interrupção de pequena corrente indutiva, chaveamento de banco de capacitores e linha de transmissão, e energização de transformadores de potência.

Esse artigo tratará do controle do instante de fechamento e as seguintes manobras serão abordadas:

- energização e religamento da linha de transmissão 525 kV Blumenau/Campos Novos; e
- energização do terceiro transformador de Blumenau 525/230 kV.

Também serão apresentadas as bases para o desenvolvimento de um dispositivo de chaveamento controlado utili-

zando um sistema de processamento digital de sinais (DSP) que, por ser de caráter geral, considerará adicionalmente as manobras de reatores e de capacitores.

## II. ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

As simulações da energização da linha de transmissão Blumenau/Campos Novos foram realizadas utilizando a configuração da figura 1. Para essas simulações foi utilizado o programa ATP (Alternative Transients Program).

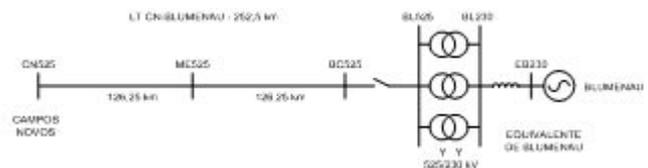


Figura 1 - Sistema Simulado – Energização de LT

Trata-se de uma linha de transmissão de 252,5 km de extensão em 525 kV, onde o disjuntor foi representado por uma chave entre os pontos BL525 e BC525.

Foram monitoradas as tensões nas barras BC525, ME525 e CN525, respectivamente início, meio e fim da linha.

Foram realizadas simulações para a determinação dos limites favoráveis de operação. Essas simulações consistiram em fechar o disjuntor em instantes diferentes para cada fase. As três fases foram acionadas em instantes variando a cada 30° dentro de um ciclo completo da onda de tensão, pesquisando todas as combinações possíveis de fechamento de cada fase.

Dos resultados obtidos pode-se constatar que:

- As menores sobretenções se verificam para fechamentos na passagem das três fases de tensão pelo zero ou próximo ao zero;
- As maiores sobretenção foram observadas para fechamento na passagem da tensão pelo máximo em pelo menos duas fases.

As simulações realizadas resultaram em uma distribuição de sobretenções onde o valor médio foi 2,33 pu e o desvio padrão 0,23 pu. Definiu-se para efeito de análise uma máxima sobretenção admissível de 2,10 pu que corresponde ao valor médio menos um desvio padrão, ou seja somente 15,8% das sobretenções são inferiores a este valor.

Das simulações realizadas verificou-se que as menores sobretenções ocorreram nos intervalos de fechamento das chaves apresentados na tabela 1.

<sup>1</sup> M. V. Garbelotti (Gerente do Projeto) trabalha na TBE - Transmissoras Brasileiras de Energia ([garbelotti@tbenergia.com.br](mailto:garbelotti@tbenergia.com.br))

J. A. Jardini (Coordenador do Projeto), Prof. Dr. Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da USP ([jardini@pea.usp.br](mailto:jardini@pea.usp.br))

M. Masuda (pesquisador), R. P. Casolari e G. Y. Saiki (Pesquisadores) trabalham na EPUSP/PEA/GAGTD – Grupo de Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia ([masuda@pea.usp.br](mailto:masuda@pea.usp.br)).

Tabela 1 - Intervalos de Fechamento

Casos	Intervalos de Fechamento		
	Fase A	Fase B	Fase C
01	-15° a 30°	330° a 30°	345° a 15°
02	-15° a 30°	330° a 15°	150° a 195°
03	-30° a 30°	150° a 195°	150° a 195°
04	150° a 195°	330° a 30°	330° a 15°
05	150° a 195°	330° a 15°	150° a 210°
06	165° a 210°	150° a 210°	150° a 210°

### III. RELIGAMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

O sistema simulado para o religamento de linha de transmissão utilizou o mesmo sistema do caso de energização de linha (figura 1).

A metodologia adotada nas simulações do presente estudo, considerando que a LT não possui compensação derivada e levando em conta os aspectos relacionados à carga residual na linha e ao ponto da onda de tensão de fechamento do disjuntor, foi a seguinte:

- Como não foram considerados equipamentos especiais que pudessem drenar a carga residual quando da abertura da LT, a manobra de religamento da LT foi simulada na presença das cargas residuais nas três fases;
- A simulação foi iniciada com a LT operando em condições normais;
- A seguir, foi simulada a abertura trifásica da LT, de modo a garantir a existência de cargas residuais nas três fases;
- Na presença dessas cargas residuais, foi simulado o religamento da LT com as três fases acionadas em instantes variando a cada 30° dentro de um ciclo completo da onda de tensão. Foram pesquisadas todas as combinações possíveis de fechamento de cada fase.
- A seguir, foram analisados os valores máximos obtidos das tensões no início, meio e fim da linha para cada uma das três fases. Esses valores foram tabulados e ordenados de modo a se identificar o comportamento dos valores das sobretensões originados no religamento da LT;
- Finalmente, foram identificadas as faixas sobre a onda de tensão de cada fase que originaram as menores sobretensões no sistema.

O critério de sobretensão máxima admissível foi o mesmo utilizado nos estudos de energização da LT, ou seja, admitiu-se uma sobretensão máxima de 2,10 p.u. no sistema, assumindo-se que esse valor apresenta uma relação (custo x desempenho) adequada para os estudos de coordenação de isolamento das linhas e subestações.

A figura 2 apresenta as cargas residuais (tensões) nas 3 fases da LT resultantes da manobra de abertura da LT.

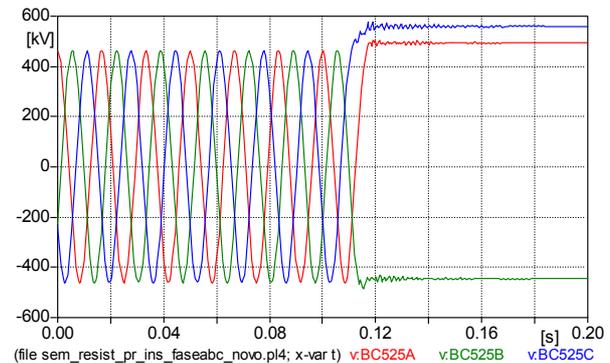


Figura 2 - Cargas Residuais nas Três Fases da LT (Tensões na barra de Blumenau)

Os valores das cargas residuais obtidos foram:

Fase A: + 493,42 kVpico;

Fase B: - 445,26 kVpico;

Fase C: + 559,30 kVpico.

Os resultados obtidos mostraram que os melhores instantes de fechamento para as fases A e C ocorreram quando as tensões nessas fases estavam passando pelo ciclo positivo. Já para a fase B isso ocorre quando a tensão estava passando pelo ciclo negativo.

As maiores restrições, em termos de intervalo de acionamento, ocorreram para a fase C (maior tensão residual, em módulo). Para esta fase, o intervalo entre 60° e 120° contempla todas as melhores situações encontradas.

As demais fases apresentaram restrições menores: fase A (intervalo entre 30° e 120°) e fase B (intervalo entre 210° e 300°).

Na análise dos resultados deve-se ter em consideração:

- o estudo considerou o religamento da LT na presença de cargas residuais nas 3 fases, que permaneceram praticamente constantes durante o período em que a LT esteve aberta;
- o controle para o religamento de cada fase é função da carga residual existente na fase;
- na seleção dos intervalos de fechamento das 3 fases do religamento da LT, adotou-se uma sobretensão máxima admissível de 2,10 p.u. (mesmo valor adotado no estudo de energização da LT);
- foi verificado que a fase com maior tensão residual apresentou um intervalo de fechamento, onde o religamento é desejável, menor do que os intervalos das demais fases;
- como qualquer fase pode apresentar fluxo residual máximo, em módulo, dependendo do instante de abertura da LT, adotou-se o intervalo de fechamento menor para as 3 fases. Assim, para a fase com tensão residual positiva, o religamento deve ser realizado entre 60° e 120°, valor médio 90° (máxima tensão positiva). Para a fase com tensão residual negativa, o religamento deve ser realizado entre 240° e 300°, valor médio 270° (máxima tensão negativa).

### IV. ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR

Somente transformadores com núcleos monofásicos e enrolamentos aterrados podem ser considerados como três transformadores monofásicos, porém a grande maioria dos transformadores de potência tem interação entre as fases.

Nesses transformadores, após uma fase ter sido energizada, o fluxo nos outros núcleos ou “pernas” do núcleo não é um fluxo residual estático, mas um fluxo transitório, normalmente denominado fluxo “dinâmico” do núcleo.

Para esses transformadores existem, na prática, 3 estratégias de controle do chaveamento, as quais podem ser utilizadas isoladamente ou combinadas:

- energização em tempos fixados, sem medição do fluxo residual;
- energização em tempos fixados, baseados no controle da abertura precedente (desenergização);
- energização nos tempos que levam em consideração o fluxo residual resultante da abertura precedente.

Na primeira estratégia, as sobretensões resultantes da energização podem ser reduzidas com o chaveamento ocorrendo nos valores máximos da tensão de cada fase, embora as sobretensões temporárias e as correntes de “inrush” geradas não são desprezíveis em algumas condições.

A segunda estratégia está baseada no fato que muitos disjuntores são capazes de “cortar” pequenas correntes de magnetização, mesmo no valor de “pico”. Isto significa que o disjuntor pode desenergizar o transformador em qualquer ponto da onda de tensão, resultando num fluxo residual ajustado às necessidades da energização subsequente. Contudo, dependendo da velocidade de restabelecimento do dielétrico do disjuntor, alguns instantes devem ser proibidos a fim de prevenir reignição do disjuntor.

Na terceira estratégia existem 3 possibilidades:

- *energização rápida*: nesta estratégia, a primeira fase é fechada e as outras duas são fechadas dentro do “quarto de ciclo” subsequente. Isto requer conhecimento do fluxo residual nas três fases e controle independente dos pólos do disjuntor;
- *energização simultânea*: nesta estratégia as três fases são fechadas ao mesmo tempo, num ponto ótimo definido para um determinado padrão de comportamento dos fluxos residuais. Isto não requer controle independente dos pólos do disjuntor, mas requer o conhecimento do fluxo residual nas três fases e que as magnitudes dos fluxos residuais sejam elevadas em duas fases (um valor positivo e o outro negativo) e na outra fase um valor próximo a zero.
- *energização atrasada*: A primeira fase a ser energizada é aquela com maior fluxo residual. Isto é vantajoso pois permite a energização num baixo valor da tensão da fonte, impondo uma menor sollicitação de tensão no transformador no instante da energização.

Para as fases remanescentes, diferentes aproximações podem ser usadas para reduzir ou eliminar a saturação do núcleo, levando em consideração a rede e as características do disjuntor. Uma aproximação que tem sido estudada e aplicada com sucesso é o fechamento das duas fases remanescentes no mesmo instante, alguns meio-ciclos após a passagem pelo zero da tensão da primeira fase, uma vez que o fluxo residual nas outras duas fases é rapidamente eliminado em alguns ciclos. Num aplicação real, um atraso de 4,5 ciclos tem sido usado com sucesso.

Com base na metodologia da energização atrasada, o projeto adotou o seguinte:

“Energização inicial da fase com maior fluxo residual (em módulo). Após 4,5 ciclos serão fechadas, simultaneamente, as 2 fases remanescentes. Serão pesquisados os melhores instantes de fechamento, dentro da onda de tensão das fases (simulação a cada 30° da onda de tensão).”

Para a energização do terceiro transformador de Blumenau foi utilizado o sistema abaixo:

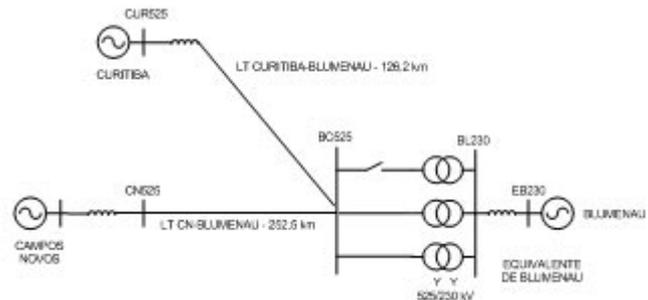


Figura 3 - Sistema Simulado – Energização de Transformador

O trabalho contempla apenas as energizações pelo lado 525 kV, os disjuntores não estão dotados de resistores de pré-inserção e a rede foi simulada na configuração menos amortecida, ou seja, rede em vazio com as cargas representadas por equivalentes de curto-circuito com fluxo de potência igual a zero.

Para a obtenção dos fluxos residuais, inicialmente foi simulada a abertura do transformador. Os resultados obtidos mostraram que a primeira fase que abriu (fase C) permaneceu com uma tensão residual da ordem de 1,30 p.u. e as demais fases permaneceram com tensões residuais superiores ao valor nominal (de pico) da tensão de fase da LT (428,66 kVpico).

Em seguida foi simulada a operação de energização do transformador, sendo que na análise dos resultados deve-se ter em consideração:

- o estudo considerou a energização do transformador ocorrendo após uma desenergização, isto é, na presença de fluxos residuais nas 3 fases;
- segundo as referências bibliográficas consultadas, para o tipo de transformador analisado, a soma dos 3 fluxos residuais é igual a zero;
- ainda, segundo essas mesmas referências, o fluxo residual em uma das fases tem valor próximo a zero, consequentemente, nas outras 2 fases os fluxos residuais têm valores próximos em módulo;
- a primeira fase a ser energizada é aquela com maior fluxo residual (tensão do lado fonte monitorada);
- as fases remanescentes são energizadas, simultaneamente, 4,5 ciclos após a primeira fase;
- o controle para fechamento das fases remanescentes é fornecido pela fase com maior fluxo residual entre elas;
- na seleção dos intervalos de fechamento das 3 fases do transformador, adotou-se o valor de 1,20 p.u. como o máximo admissível em cada fase. Até esse valor, o transformador se comporta como elemento essencialmente linear, e a corrente de “inrush” não é elevada comparativamente à corrente nominal do transformador.

Das simulações realizadas verifica-se:

### A. Energização de Fase com Fluxo Residual Máximo Positivo

A primeira fase (com fluxo residual máximo positivo) deve ser energizada nas faixas entre  $90^\circ$  e  $120^\circ$  e entre  $240^\circ$  e  $270^\circ$  da onda de tensão do lado fonte.

Os melhores instantes de energização das 2 fases remanescentes ocorreram nas seguintes faixas da onda de tensão (lado fonte da fase com maior fluxo residual entre elas): entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$  e entre  $210^\circ$  e  $240^\circ$ .

Considerar a diferença de 4,5 ciclos entre a energização da primeira fase e das fases remanescentes.

### B. Energização de Fase com Fluxo Residual Máximo Negativo

A primeira fase (com fluxo residual máximo negativo) deve ser energizada nas faixas entre  $60^\circ$  e  $90^\circ$  e entre  $270^\circ$  e  $300^\circ$  da onda de tensão do lado fonte.

Os melhores instantes de energização das 2 fases remanescentes ocorreram nas seguintes faixas da onda de tensão (lado fonte da fase com maior fluxo residual entre elas): entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$  e entre  $210^\circ$  e  $240^\circ$ .

Considerar a diferença de 4,5 ciclos entre a energização da primeira fase e das fases remanescentes.

## V. DISPOSITIVO DE CHAVEAMENTO CONTROLADO

Neste tópico são especificadas as bases para o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico que permitirá a manobra (fechamento) sincronizada de disjuntores visando menor solicitação transitória (sobretensão, sobrecorrente) ao sistema. Serão consideradas as seguintes situações:

- manobra de transformadores
- manobras de linhas sem compensação *shunt*
- manobras de linhas com compensação *shunt*
- manobra de reatores
- manobra de capacitores

O equipamento deverá ser aplicável a:

- disjuntor de operação monopolar e tripolar.
- qualquer arranjo de subestações (inclusive 1 ½ disjuntor e barra dupla)
- ajuste do tempo de operação considerando a influência da temperatura ambiente, pressão de Nitrogênio/óleo, e tensão auxiliar CC
- auto ajuste por desvio de desempenho no tempo.

### C. Manobra (fechamento) de transformadores em vazio

O critério de fechamento consiste em ter fluxo magnético igual dos dois lados do disjuntor. Desta forma é preciso conhecer como foi desenergizado o transformador, para se determinar o fluxo residual. Caso não se possa conhecer o fluxo residual, o critério é fechar quando a tensão do lado barra está no pico (corrente de inrush estará perto do zero).

O transformador será desenergizado quando todos os disjuntores estiverem abertos. Na figura a seguir apresentam-se as correntes e tensões na ocasião da desenergização (último disjuntor numa fase a abrir).

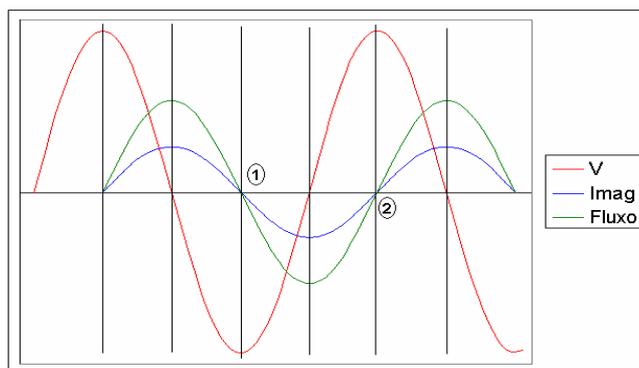


Figura 4 - Tensão, Corrente e Fluxo no Transformador

A interrupção pode ocorrer em duas situações 1 ou 2.

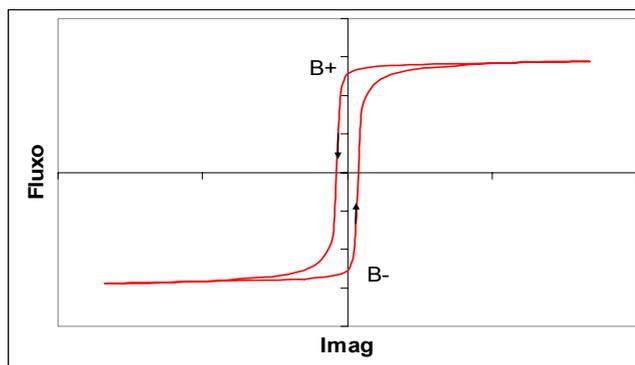


Figura 5 - Curva de Histerese do Transformador

Na situação 1 o fluxo residual será B+ e na situação 2 será B-, com magnitude B proporcional (curva de saturação) a tensão. A identificação poderá ser feita pela tensão (negativa no caso 1 próximo à interrupção e positiva no caso 2)

As seguintes situações precisam ser analisadas em função do tipo de transformador (ou banco) para o devido cálculo do fluxo residual.

- Transformador 5 pernas  $\Delta Y$
- Transformador 3 pernas  $\Delta Y$
- Transformador 3 pernas YY
- Banco transformador  $\Delta Y$

O cálculo deverá ser feito olhando a tensão no enrolamento  $\Delta$  e Y, dependendo onde a tensão é medida.

Uma vez conhecido o fluxo residual em cada bobina o critério utilizado é o apresentado no item IV (Energização de Transformador), ou seja, primeiro é energizada a fase com fluxo residual máximo (positivo ou negativo) e as demais fases 4,5 ciclos depois.

O sistema torna-se bastante complexo quando se deseja flexibilidade operativa, com certos arranjos de subestação. Neste caso deverão ser previstas lógicas especiais. A título de exemplo, será discutido o caso da figura a seguir. Iniciemos pelo cálculo de fluxo residual.

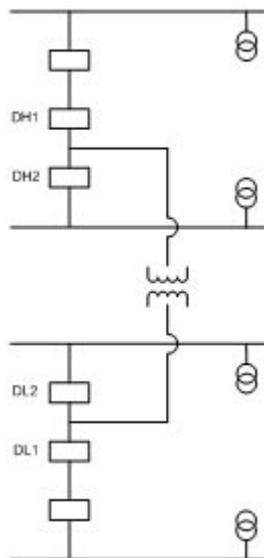


Figura 6 - Arranjo da Subestação Exemplo

Deve-se criar uma lógica para identificar quando o último disjuntor abriu após ser comandado.

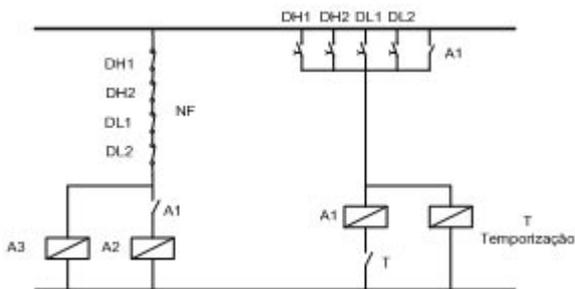


Figura 7 - Circuito de Acionamento dos Disjuntores

O contato NA do relé auxiliar A2 dará indicação para o cálculo do fluxo residual.

Para máxima flexibilidade deverá haver um sincronizador em cada disjuntor. Cada um deles recebe a tensão na alta e/ou baixa do transformador e calcula o fluxo residual.

Na figura a seguir são mostrados os sinais necessários em cada sincronizada.

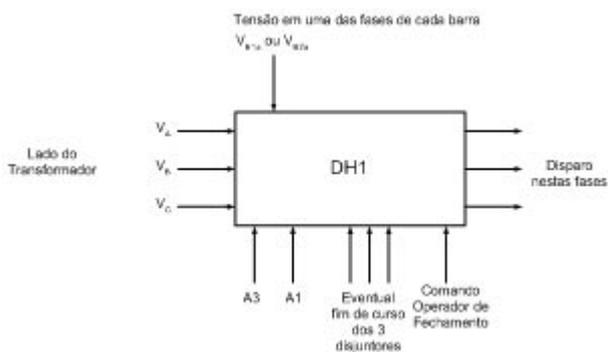


Figura 8 - Sincronizador para Energização de Transformador

Os seguintes cálculos são, portanto, efetuados:

- identificar a interrupção de tensão (contato A1)
- determinar o fluxo residual observando as tensões nos enrolamentos ( $V_{\theta T}$  se Y e  $V_{\theta\theta}$  se  $\Delta$ )
- identificar comando do operador de fechamento

- calcular  $\int V_{Ba} dt$  com a barra adequada (as demais fases estão  $120^\circ$  defasadas) determinando o instante ( $t_0$ ) que levará a igualdade de fluxo nas bobinas
- acrescentar o tempo de fechamento e atraso para fechar em  $(\omega t_0 + k 360^\circ)$ .

#### D. Manobra (fechamento) de linhas sem compensação shunt

O critério é fechar o disjuntor quando a tensão for igual nos dois terminais deste.

Se for energização de linha, o disjuntor é fechado quando a tensão instantânea no lado barra é zero. Se for religamento o fechamento deve ocorrer quando a tensão no lado barra for igual à carga residual da linha.

No primeiro caso após fechar uma fase, as outras duas são fechadas  $1/6$  do ciclo a seguir.

Aqui se aplica a mesma discussão com relação ao arranjo da subestação.

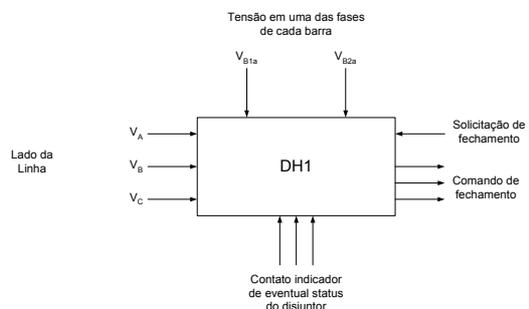


Figura 9 - Sincronizador para Linha de Transmissão

Nota: Neste caso aparece um sinal de tensão a mais que o caso anterior.

#### E. Manobra (fechamento) de linhas com compensação shunt.

Este caso é similar ao anterior (linha sem compensação shunt), porém no religamento agora, a carga residual oscila com 2 frequências superpostas (1 perto de 60 Hz e outra da ordem de 10 Hz para as compensações shunts usuais).

O religamento é feito depois de um tempo morto (ex.  $\sim 0,5$  s) quando parte da oscilação está amortecida. Há necessidade, entretanto, de ser lida a tensão da linha para o adequado fechamento do disjuntor.

#### F. Manobra de reatores

A manobra de reatores deve ser controlada tanto na abertura como no fechamento. Na abertura o critério é ter tempo de arco interno no disjuntor o maior possível (0,5ms) de forma a evitar “chopping” de corrente. Já o fechamento deve ser feito no valor máximo de tensão do lado barra objetivando a menor corrente de inrush.

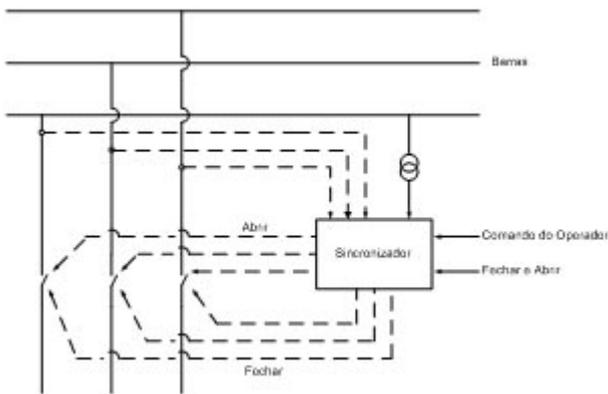


Figura 10 -Sincronizador para Manobra de Reatores

Notar que em relação ao primeiro caso necessita-se de 3 saídas digitais adicionais.

#### G. Manobra de capacitores

Neste caso o controle de abertura tem por objetivo evitar tempos de arco pequeno. O controle de fechamento é feito com diferença de potencial nula através de contatos do disjuntor. Como em geral o capacitor está descarregado antes da energização ( $V=0$ ) o critério consiste em fechar quando a tensão instantânea da barra é zero.

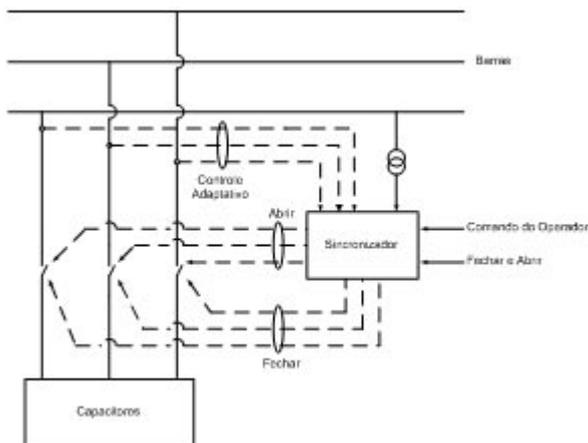


Figura 11 -Sincronizador para Manobra de Capacitores

#### H. Equipamento geral

Para atender todas as condições é preciso que o equipamento geral tenha as seguintes entradas e saídas:

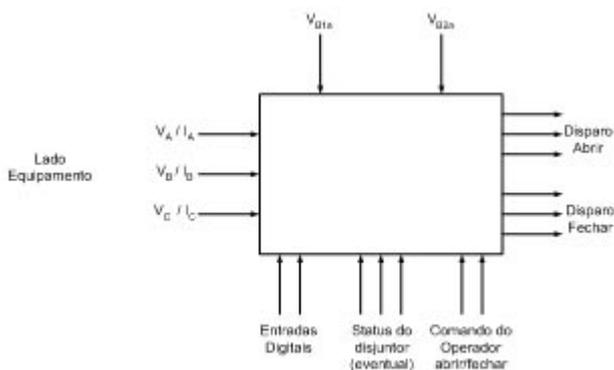


Figura 12 -Equipamento Geral

## VI. CONCLUSÕES

O projeto de acionamento de disjuntores tem duração de 4 anos, estando no início do terceiro ano, com o desenvolvimento e testes do protótipo do dispositivo para manobras de fechamento. O equipamento será submetido aos testes de desempenho e validação para verificar a teoria e as simulações apresentadas nesse artigo. A fase posterior do projeto contemplará os instantes de abertura dos contatos do disjuntor, complementando os requisitos necessários para a especificação completa do dispositivo de acionamento..

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WG 13.07 “Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers”, Part 1, ELÉCTRA No. 183, Pages 43 – 73, 1999.
- [2] WG 13.07 “Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers”, Part 2, ELÉCTRA No. 185, Pages 35 – 37, 1999.
- [3] H. Ito “Controlled Switching Technologies, State-of-the-Art”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Pages 1455 – 1460, Vol. 2, 2002
- [4] J. H. Brunke, K. J. Fröhlich “Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. Part I: Theoretical Considerations”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 16, Issue: 2, April 2001, Pages: 276 – 280.
- [5] J. H. Brunke, K. J. Fröhlich “Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. Part II: Application and Performance Considerations”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 16, Issue: 2, April 2001, Pages: 281 – 285
- [6] Rocha, A. C. Carvalho, J. L. Távora “Manobra Controlada: Modelagem da Suportabilidade Dielétrica do Disjuntor Durante a Operação de Fechamento”, XIV SNPTEE, Belém, Brasil, 1997