



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0804330-2 B1



(22) Data do Depósito: 13/10/2008

(45) Data de Concessão: 12/03/2019

---

(54) **Título:** MÉTODO PARA RELIGAMENTO TRIPOLAR RÁPIDO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO REATIVA EM DERIVAÇÃO

(51) **Int.Cl.:** G01R 31/08; H02H 3/06; H01H 9/56.

(73) **Titular(es):** UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP.

(72) **Inventor(es):** MARIA CRISTINA DIAS TAVARES; PATRICIA MESTAS VALERO.

(57) **Resumo:** MÉTODO PARA RELIGAMENTO TRIPOLAR RÁPIDO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO REATIVA EM DERIVAÇÃO A presente invenção descreve um método para controle de sobretensões durante a manobra de religamento de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação. Após o disjuntor abrir uma LT, a interação entre a admitância transversal da linha e a indutância do reator de compensação reativa faz com que a tensão entre os pólos do disjuntor assumam forma oscilatória (batimento). O ponto ótimo para voltar a fechar o disjuntor corresponde à região onde a amplitude do batimento da tensão entre os pólos do disjuntor é mínima. O método desenvolvido apresenta maior segurança na determinação da primeira região de mínimo do batimento, independente da passagem da onda de tensão por zero. Tal procedimento permite também contar com maior margem de tempo para operar o disjuntor já que a detecção da região ótima para o religamento ocorre com vários ciclos de frequência fundamental de antecedência. Este método deve ser incorporado na lógica de controle de um relé digital para religamento tripolar de linhas de transmissão gerando um novo relé digital para religamento tripolar adaptativo de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação.

## 5 **MÉTODO PARA RELIGAMENTO TRIPOLAR RÁPIDO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO REATIVA EM DERIVAÇÃO**

### CAMPO DA INVENÇÃO

10 O fenômeno físico responsável pelas sobretensões de manobra em Linha de Transmissão (LT) é a propagação das ondas eletromagnéticas ao longo das linhas. Os efeitos negativos causados por essas sobretensões podem ser consideravelmente reduzidos controlando-se a abertura e fechamento dos contatos dos disjuntores de forma que a manobra seja realizada em um instante ótimo pré-determinado, tomando-se como referência  
15 sinais elétricos de tensão entre os contatos do disjuntor.

Para ilustrar o campo da invenção, um sistema elétrico exemplo é mostrado no diagrama unifilar da Figura 1, o qual compreende um equivalente do sistema elétrico representado por fonte ideal 1, linha de transmissão 2, reatores de compensação 3 e disjuntor 4.

20 O sistema exemplo tem tensão nominal de 500 kV e frequência industrial de 60 Hz. A linha de transmissão permite o transporte de energia através de suas três fases denominadas fase A, fase B e fase C.

O disjuntor 4 modelado possui três comandos monopolares independentes cada um associado a uma fase. O disjuntor irá efetuar a  
25 interrupção da corrente entre o sistema elétrico 1 e a linha 2.

Os reatores em derivação 3 são dimensionadas para absorver parte da potência reativa capacitiva geradas pelas linhas de transmissão quando em vazio ou em operação sob carga leve.

O disjuntor 4 isola o sistema elétrico 1 da linha 2 quando os contatos  
30 (pólos) das três fases são abertos. Após um tempo os contatos das três fases são religados (fechados). No instante do religamento ocorre uma variação brusca na tensão da rede surgindo tensões maiores do que as normais e que irão desaparecer após alguns ciclos da frequência fundamental (sobretensões transitórias). Estas sobretensões se propagam ao longo das linhas do sistema  
35 elétrico. O religamento trifásico (tripolar) de linhas de transmissão é uma

5 manobra muito freqüente no sistema de transmissão e pode ocasionar sobretensões transitórias muito severas.

Uma solução tradicional para minimizar as sobretensões transitórias geradas pelo religamento trifásico é o uso do resistor de pré-inserção cujo arranjo de atuação é tal que quando a linha de transmissão é religada, inicialmente, fecha-se um contato auxiliar que insere o resistor de pré-inserção em série com a linha de transmissão. Ao inserir o resistor a tensão que seria imposta sobre a linha é dividida entre a linha e o resistor e as sobretensões transitórias, função da tensão aplicada na linha, serão menores. Após um breve período de tempo fecha-se um contato principal, curto-circuitando desta forma o resistor e trazendo para a linha a tensão plena do sistema. Esta solução, embora seja efetiva, tem o inconveniente do alto custo de fabricação e manutenção.

Os efeitos negativos causados por sobretensões de manobra podem ser consideravelmente reduzidos controlando-se o fechamento dos contatos dos disjuntores de forma que as manobras sejam realizadas em instantes ótimos pré-determinados, tomando-se como referência valores da tensão entre os contatos do disjuntor.

No religamento trifásico os contatos do disjuntor devem ser fechados quando a tensão entre os mesmos for mínima. Este instante varia segundo a configuração da rede e pode ser determinado mediante um algoritmo em função dos sinais de tensão medidos entre os contatos do disjuntor. A implementação desta solução se beneficia do fato de que a onda de tensão entre os contatos do disjuntor assume forma oscilatória (batimento) devido à interação entre a admitância transversal da linha e a indutância dos reatores em derivação, existindo uma faixa ótima na onda de tensão para religar o disjuntor correspondente à região na qual a amplitude do batimento da tensão é mínima.

#### TÉCNICAS RELACIONADAS

Atualmente, para o controle de sobretensões na manobra de religamento tripolar de linhas de transmissão, de maneira geral, utiliza-se o

5 resistor de pré-inserção que embora seja um método efetivo apresenta baixa confiabilidade, além do alto custo agregado à fabricação e à manutenção dos disjuntores.

Na publicação da *IEEE Transactions on Power Delivery* de Abril, 1997: "*Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development*" é descrito um dispositivo de controle que identifica a primeira região de amplitude mínima do batimento e envia uma ordem para o disjuntor fechar na próxima região semelhante.

De acordo com este método, inicialmente os sinais de tensão do lado da linha e do lado da fonte são obtidos, estes sinais são monitorados num intervalo de tempo (normalmente num período da frequência fundamental) proporcionando um primeiro conjunto de dados. Estes dados são armazenados e um novo conjunto de dados é adquirido. Ambos os conjuntos são comparados entre si. Se os dois conjuntos de dados não forem iguais, um terceiro conjunto de dados é adquirido e assim por diante. Quando as equivalências são encontradas entre dois conjuntos de dados, a periodicidade dos sinais é concluída e a região de mínimo identificada.

Segundo o método acima citado, os instantes ótimos a serem considerados para religamento correspondem à passagem por zero da tensão no período de menor amplitude do batimento destes sinais. Por conseguinte tal método identifica a primeira região de amplitude mínima e envia uma ordem para o disjuntor fechar na próxima região semelhante.

Este método não é satisfatório porque o fechamento somente irá ocorrer após a primeira região de amplitude mínima, o que implica em um tempo maior da linha fora de serviço. Além disso, a redução da sobretensão é menor quando o fechamento ocorre para as regiões de amplitude mínima subseqüentes, fazendo com que seu desempenho fique semelhante ao método do resistor de pré-inserção.

O documento de patente US 5.361.184 revela um controlador seqüencial adaptativo para controlar um disjuntor ou outro dispositivo de chaveamento para eliminar transitórios em uma linha de distribuição causada

5 por fechamento e abertura do disjuntor. O dispositivo adaptativo compensa as  
mudanças no tempo de resposta do disjuntor devido ao envelhecimento e  
efeitos do meio ambiente. Um transformador de potencial fornece um sinal de  
referência correspondente à passagem pelo zero da forma de onda de tensão,  
10 e um circuito comparador de mudança de fase que compara o sinal de  
referência com o tempo em que qualquer transitório foi produzido quando o  
disjuntor estava fechado, gerando um sinal indicativo de que um ajuste  
adaptativo deve ser feito. Similarmente, em relação à abertura do disjuntor, um  
transformador de corrente fornece um sinal de referência que é comparado  
15 com o intervalo de tempo para o transitório ser detectado enquanto o disjuntor  
estava aberto. Um circuito de ajuste adaptativo produz uma compensação de  
tempo que é apropriadamente modificado para considerar as mudanças na  
resposta do disjuntor, incluindo efeitos de desgaste e intempéries. Na abertura  
ou fechamento subsequente, o disjuntor é ativado num tempo apropriadamente  
20 compensado, para que feche quando a tensão passar pelo zero e abra quando  
a corrente passar pelo zero, minimizando quaisquer transitórios na linha de  
distribuição. O ângulo da fase pode ser usado para controlar a abertura do  
disjuntor relativo ao sinal de referência fornecido pelo transformador de  
potencial.

25 Similarmente, a patente US 5.627.415 é também relacionada a uma  
técnica de controle de sobretensão a qual considera a primeira passagem pelo  
zero do sinal de tensão, depois da detecção do sinal de abertura/fechamento,  
inicia uma série de etapas pré-determinadas e temporizadas que reduzem ou  
eliminam a sobretensão depois de abrir/fechar um disjuntor em uma linha de  
alta tensão.

30 Ainda sobre o assunto em questão, controle de sobretensão em  
linhas de transmissão, a patente US 5.629.869 descreve um disjuntor  
inteligente ou dispositivo comutador que compreende três unidades  
computadorizadas separadas, incluindo uma unidade de monitoramento de  
condição (CMU, do inglês *condition monitoring unit*) 40, uma unidade de  
35 controle de disjuntor (BCU, do inglês *breaker control unit*) 50, e uma unidade de

5 controle simultâneo (SCU, do inglês *synchronous control unit*) 60. O CMU 40,  
fornece um diagnóstico detalhado a partir do monitoramento de quantidades  
chaves associadas à confiabilidade do disjuntor ou dispositivo comutador.  
10 Análises on-line executadas pelo CMU fornecem informações facilitando o  
desempenho de manutenção de acordo com a necessidade e a identificação  
de falha iminente. A BCU 50 é um sistema programável com auto-diagnóstico e  
comunicações remotas. Tal unidade substitui controles eletromecânicos  
convencionais tradicionalmente usados no controle de disjuntores ou  
15 dispositivos comutadores. A SCU 60 provê controles simultâneos de dispositivo  
comutadores para abertura e fechamento de interruptores do circuito. Os  
processos de controle realizados minimizam o efeito da variação transitória do  
sistema e de desgaste do interruptor. O disjuntor inteligente ou dispositivo  
comutador aperfeiçoa a operação do sistema e manutenção do equipamento.

#### SUMÁRIO DA INVENÇÃO

20 A presente invenção tem por objetivo descrever um método para  
controle de sobretensões durante a manobra de religamento de linhas de  
transmissão com compensação reativa em derivação, que opera a partir de um  
método para identificar com bastante antecedência a região ótima na tensão  
para o chaveamento do disjuntor, permitindo fechar o mesmo já no primeiro  
25 mínimo do batimento da tensão entre os contatos do disjuntor após o tempo  
morto de atuação da proteção. O método permite considerar a dispersão e a  
característica dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento, pois a  
região de mínimo do batimento é maior que alguns ciclos da frequência  
fundamental.

30 Este método deve ser incorporado em um relé digital para controlar o  
religamento tripolar rápido de linhas de transmissão com compensação reativa.

#### BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar de um sistema elétrico.

A Figura 2 apresenta a forma da onda de tensão das três fases (A, B  
e C) entre os terminais dos contatos do disjuntor de uma linha de transmissão

5 com 90% de compensação em derivação, onde se encontra destacada a região de menor amplitude de batimento.

A Figura 3 apresenta um diagrama de blocos para chaveamento controlado do religamento de LT com compensação reativa em derivação.

10 A Figura 4 apresenta um gráfico com a forma de onda da diferença de potencial entre os terminais dos contatos da fase A do disjuntor.

A Figura 5 apresenta um gráfico com o valor eficaz da diferença de potencial entre os pólos do disjuntor.

A Figura 6 apresenta um gráfico onde o instante de abertura do disjuntor é identificado.

15 A Figura 7 apresenta um gráfico dos instantes de crescimento e decaimento do sinal filtrado após a abertura do disjuntor.

A Figura 8 apresenta um gráfico com a identificação do primeiro semiciclo.

20 A Figura 9 apresenta um gráfico que gera o tempo de duração do primeiro semi-ciclo do sinal filtrado.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

25 O método proposto desenvolvido na presente invenção se propõe a otimizar o instante de religamento trifásico dos disjuntores, reduzindo a amplitude das sobretensões. Desta forma o disjuntor pode ser fechado mais rapidamente diminuindo o tempo de interrupção do transporte de energia.

30 A presente invenção identifica com bastante antecedência o instante ótimo para o chaveamento do disjuntor na manobra de religamento tripolar, permitindo fechar o disjuntor já no primeiro mínimo do batimento após o tempo morto de atuação da proteção. O modelo permite considerar a dispersão e a característica dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento, pois a região de amplitude de mínimo batimento é maior que um ciclo de frequência fundamental.

35 O procedimento executado no método aqui descrito apresenta maior segurança na determinação do primeiro período de menor batimento, independente da passagem da onda de tensão por zero. Tal procedimento

5 permite também contar com maior margem de tempo para operar o disjuntor já que a detecção da região de mínimo ocorre com vários ciclos de frequência fundamental de antecedência.

10 A principal vantagem de se utilizar o método desenvolvido é a diminuição significativa dos níveis de sobretensão na manobra de religamento comparada com as técnicas utilizadas, devido ao fechamento do disjuntor no primeiro mínimo do batimento. O método aqui descrito deve ser codificado em um relé digital destinado ao religamento tripolar de linhas de transmissão, incorporando o novo procedimento de religamento tripolar adaptativo no código que anteriormente religava a linha baseado no tempo morto em que atuava em  
15 conjunto com o resistor de pré-inserção. O método descrito dará origem a um novo relé digital.

20 Após a ocorrência de uma falta na linha de transmissão, a proteção irá proceder à abertura tripolar, ou seja, das três fases da linha, isolando o trecho sob falta. Como a grande maioria das faltas que atingem as linhas de transmissão não são permanentes após um tempo pré-definido a proteção irá religar o trecho de linha aberto para garantir a continuidade do fornecimento de energia.

25 Quando um disjuntor opera na função de abrir uma linha em vazio, a corrente capacitiva da linha é interrompida ao passar pelo zero e quando isto ocorre, a tensão na linha estará passando pelo seu valor máximo deixando uma carga residual na linha, que não é igual nas três fases. A fase que primeiro interrompe a corrente pode chegar a ter uma tensão de até 1,3 p.u. e, a menos que esta carga seja drenada por um transformador, um reator, ou uma carga, a linha permanecerá carregada por muito tempo.

30 Se a linha for religada antes da carga residual ter sido drenada e os contatos do disjuntor fecharem quando a tensão do sistema estiver com polaridade oposta à da linha, a sobretensão transitória será elevada.

35 O decaimento da carga de uma linha em vazio quando da não existência de equipamentos conectados a terra ou de carga é muito lento, sendo governado pelas condições climáticas e ocorrendo através do

5 escoamento da carga pela cadeia de isoladores. Desta forma, a linha mantém-se carregada com praticamente sua tensão máxima por um longo período após a interrupção da corrente, sendo este tempo da ordem de 2 a 5 minutos para a descarga total da linha podendo atingir 15 minutos em condições muito secas. Se o religamento da linha acontecer nestas condições as sobretensões no terminal receptor da linha podem atingir valores muito altos que podem ocasionar efeitos negativos tais como a redução da vida útil dos equipamentos, a degradação da qualidade da energia fornecida pelo sistema elétrico e a imposição de restrições operativas tornando proibitivas algumas manobras.

10 Quando a linha é compensada com reatores em derivação, o grau de compensação tem um efeito importante na forma de onda da tensão entre os pólos do disjuntor. Devido ao circuito formado entre a admitância transversal da linha e a indutância dos reatores em derivação, a tensão entre os pólos do disjuntor assume forma oscilatória (batimento) com composição entre a frequência fundamental do sistema de um lado do contato do disjuntor com a frequência natural da linha e equipamentos de compensação do outro lado do contato do disjuntor. O período de batimento depende do grau de compensação da linha. A perda da carga do trecho de linha em vazio produz um amortecimento na amplitude da tensão no decorrer do tempo sendo a descarga função do fator de qualidade do reator. Como resultado a amplitude do batimento entre os contatos do disjuntor tende a diminuir, mas a amplitude da região de mínimo do batimento aumenta com o tempo. Em função destas condições, a região ótima nas ondas de tensão entre os pólos do disjuntor para religar o disjuntor corresponde aos primeiros intervalos de menor amplitude do batimento da tensão, conforme ilustra a Figura 2, onde encontra-se destacada a primeira região de mínimo do batimento.

30 O método desenvolvido para o fechamento rápido controlado durante a manobra de religamento tripolar de LT com compensação reativa em derivação fecha os pólos do disjuntor na região do primeiro mínimo do batimento da tensão entre os pólos do disjuntor. Para tanto se elabora um

5 algoritmo, descrito com detalhe a seguir, que identifica o instante ótimo para o religamento com bastante antecedência.

10 O programa Power System Computer Aided Design (PSCAD/EMTDC) é utilizado para implementar e avaliar o procedimento desenvolvido. A linguagem *Continuous System Model Functions* (CSMF) do programa PSCAD é utilizada na implementação das rotinas para o chaveamento controlado, as quais proporcionam uma interação dinâmica em tempo de execução com o próprio PSCAD, permitindo a simulação de dispositivos de controle tal como requerido para o desenvolvimento do trabalho.

15 A rotina CSMF permite uma maior flexibilidade nas simulações, de modo que o estado do sistema pode ser modificado dinamicamente durante a simulação a partir de programas (ou modelos) implementados nestas rotinas.

20 O algoritmo desenvolvido para implementar um método de fechamento controlado de linhas de transmissão durante a manobra de religamento tripolar é detalhado através do diagrama de blocos apresentado na Figura 3. A partir deste diagrama são feitas as seguintes explicações:

25 • As tensões de um sistema de potência são monitoradas constantemente por transformadores de potencial (TPs). Para efeitos de simulação trabalha-se com a tensão real do sistema, mas no caso de implementação do algoritmo desenvolvido nos equipamentos de proteção serão utilizadas grandezas reduzidas transformadas pelos TPs. Por outro lado, mesmo sendo o sistema trifásico, o algoritmo necessita da tensão somente de uma das fase, a qual emitirá o sinal para operar o religamento das três fases.

30 • Mediante um medidor de tensão, disponível no PSCAD, se mede a tensão no lado do sistema e a tensão no lado da linha. Assim a forma de onda da diferença de potencial entre os terminais do disjuntor aberto pode ser determinada (Figura 4).

35 • Através de um tratamento digital é possível obter o valor eficaz da diferença de potencial entre os pólos do disjuntor (Figura 5), o que é feito no PSCAD através de uma função pré-definida. Este sinal, por sua vez é tratado por um filtro eletrônico.

5           • Em seguida, o sinal filtrado é amostrado utilizando um comparador disponível no PSCAD, o qual compara duas entradas de nível, permitindo que seja identificado o instante de abertura dos pólos do disjuntor (Figura 6).

10           • A seguir são identificados os instantes de crescimento e decaimento do sinal filtrado após a abertura do disjuntor (Figura 7).

          • Gera-se um sinal que tem valor unitário durante o primeiro semi-ciclo do sinal filtrado e valor negativo após o primeiro semi-ciclo. (Figura 8).

          • Com estes resultados pode-se calcular a duração do primeiro semi-ciclo do sinal filtrado. (Figura 10).

15           • Finalmente se duplica o valor deste semi-ciclo obtendo-se a duração do período do batimento.

          Logo após a abertura dos contatos do disjuntor, o relé deve ajustar o tempo do religamento para um valor muito elevado, podendo ser este valor de 60 s. No instante em que o sinal lógico da identificação do semi-ciclo for concluído uma ordem é fornecida para que o tempo do religamento seja substituído pelo período do batimento identificado. Pode-se observar que a identificação do instante ótimo do fechamento é obtido com vários ciclos de frequência fundamental de antecedência, possibilitando um ajuste adicional, se necessário, devido à dispersão dos pólos e à característica dielétrica do disjuntor. O intervalo ótimo para o religamento tripolar é composto por vários ciclos da frequência fundamental, tendo o método proposto um longo período para efetuar as correções e os ajustes que se façam necessários.

25           A invenção aqui descrita não está limitada a essa concretização e, aqueles com habilidade na técnica irão perceber que, qualquer característica particular nela introduzida, deve ser entendida apenas como algo que foi descrito para facilitar a compreensão e não podem ser realizadas sem se afastar do conceito inventivo descrito. As características limitantes do objeto da presente invenção estão relacionadas às reivindicações que fazem parte do presente relatório.

## **REIVINDICAÇÕES**

1.- Método para religamento tripolar adaptativo rápido de disjuntor aplicado a linha de transmissão que tenha compensação reativa em derivação, e opere segundo as seguintes etapas:

- Calibração do relé para ajustar tempo do religamento para valor típico elevado após a abertura da linha.

- Medição de tensões entre os contatos do disjuntor através de transformadores de potencial (TPs);

- Obtenção do valor eficaz da tensão entre os pólos do disjuntor;

**caracterizado por** operar com as seguintes etapas:

- Filtragem do valor eficaz para eliminação das harmônicas elevadas;

- Identificação do instante de abertura do disjuntor;

- Identificação do primeiro semi-ciclo do sinal filtrado;

- Identificação da duração do primeiro semi-ciclo do sinal filtrado;

- Obtenção da duração de um ciclo de batimento; e

- Ajuste do tempo de religamento, igualando-o ao tempo do ciclo do batimento.

2.- Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo** fato de que o valor típico elevado é de 60 s.

3.- Método, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **caracterizado pelo** fato de que se obtém a tensão eficaz do batimento da diferença de potencial entre os terminais do disjuntor, a partir deste sinal se determinará o primeiro semi-ciclo do batimento e se calcula o tempo ótimo para o religamento.

4.- Método, de acordo com a reivindicação 1 a 3, **caracterizado pelo** fato de ser incorporado preferencialmente em um relé digital.

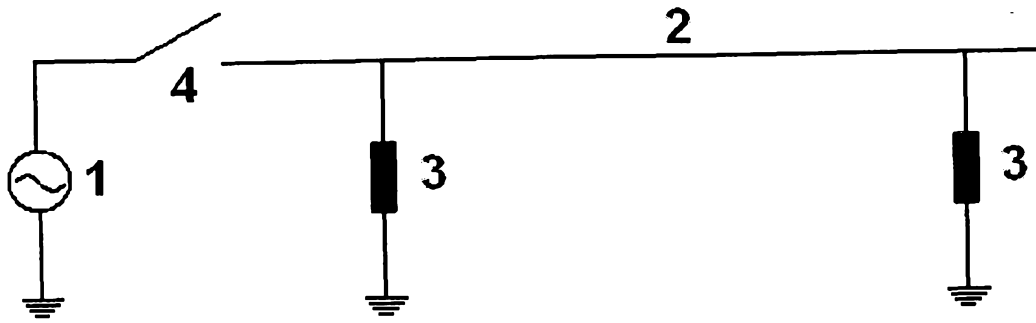


Figura 1

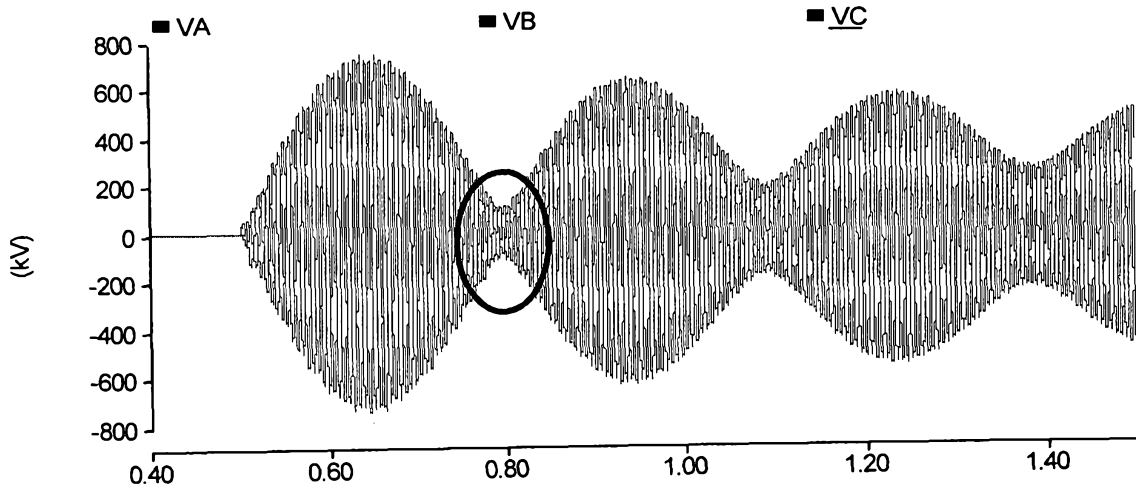


Figura 2

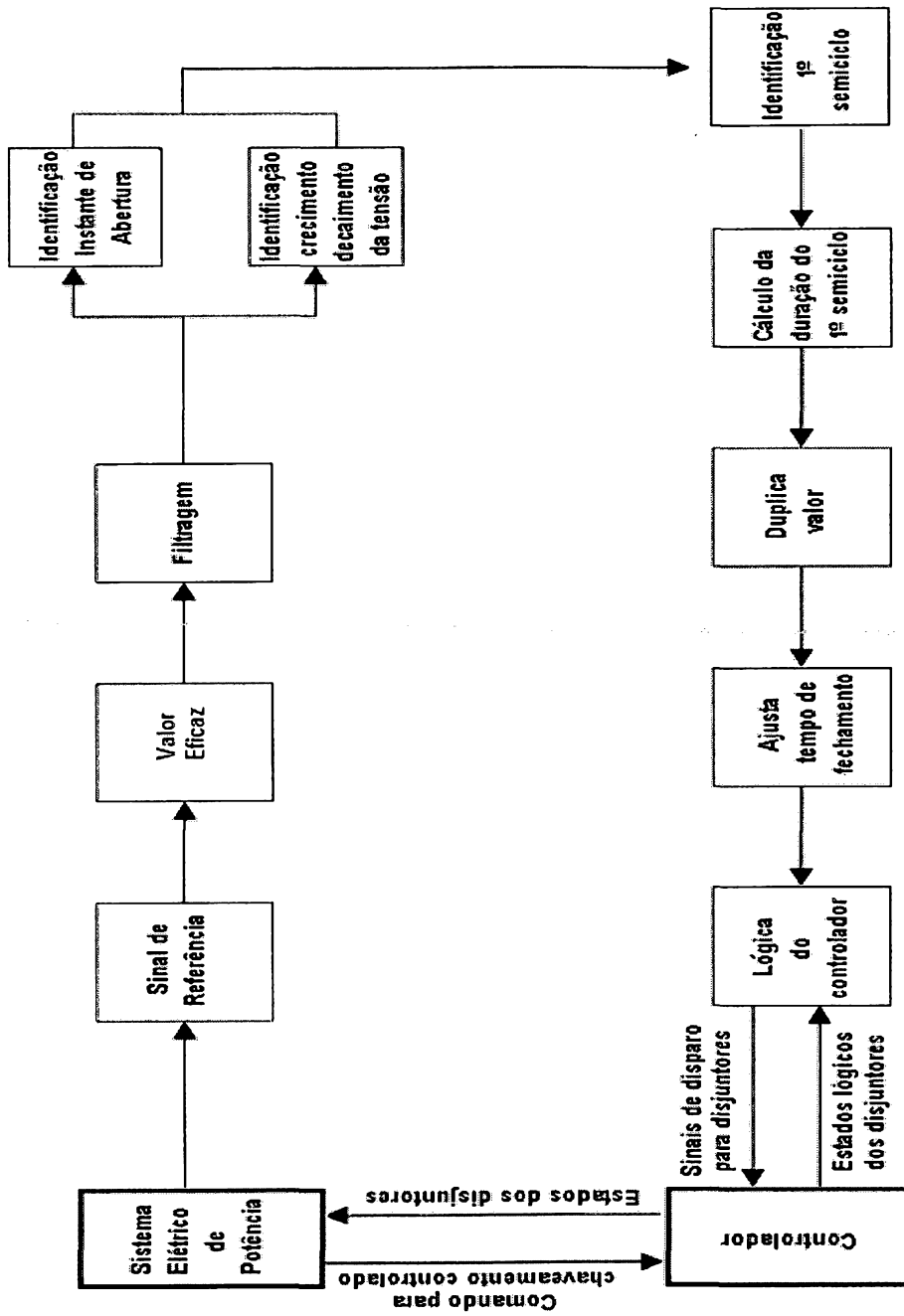


Figura 3

Figura 3

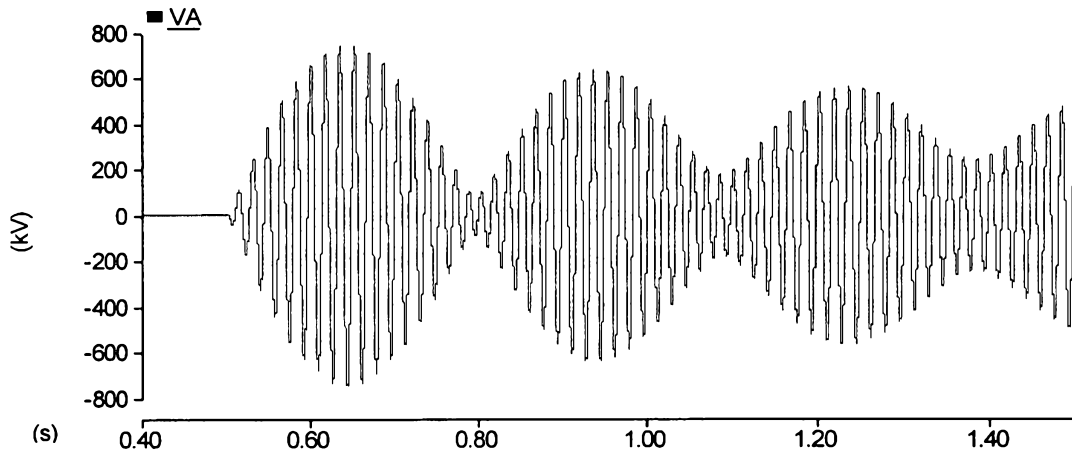


Figura 4

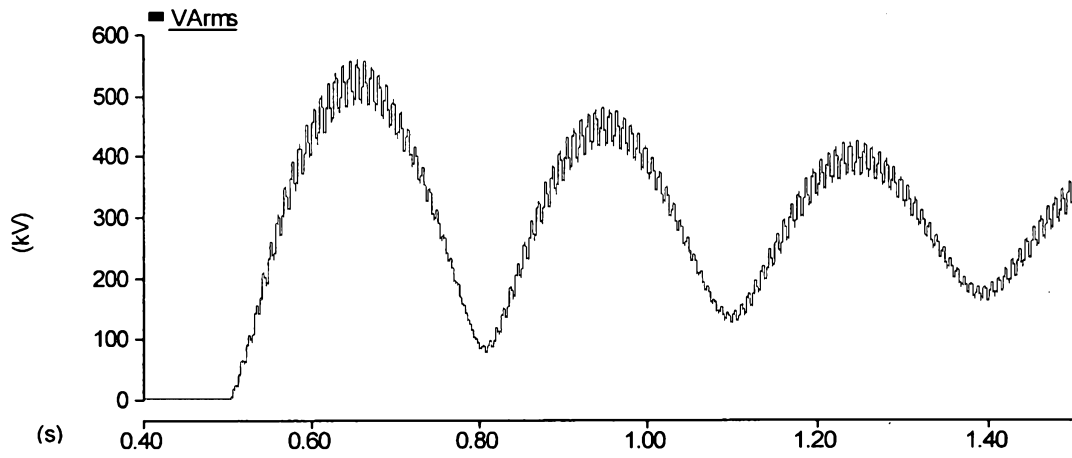


Figura 5

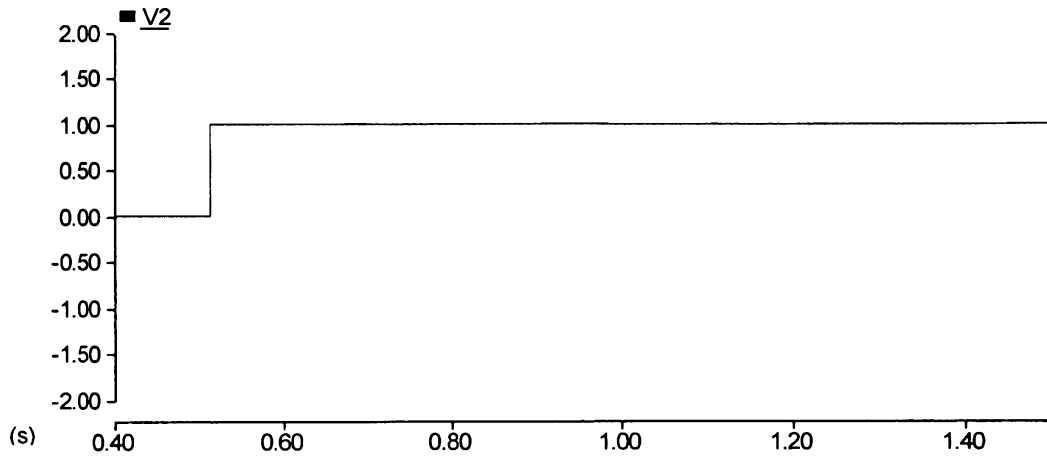


Figura 6

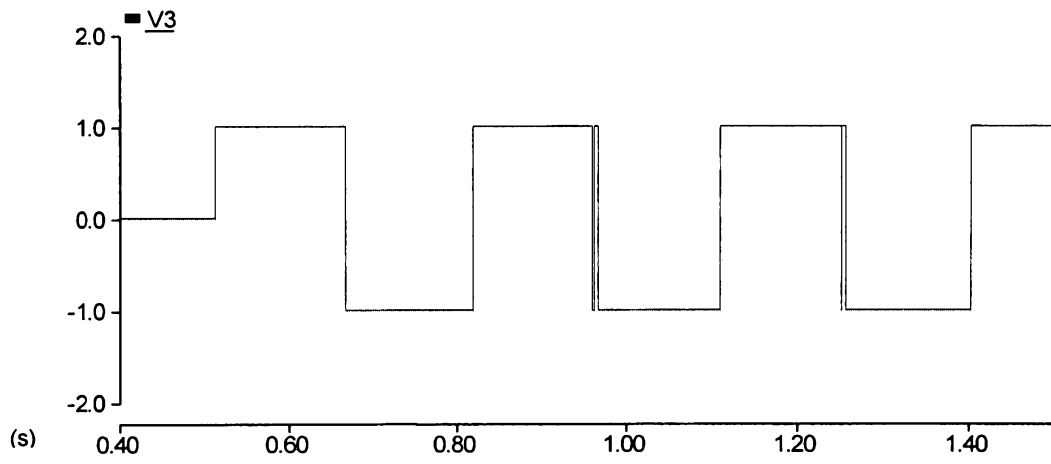


Figura 7

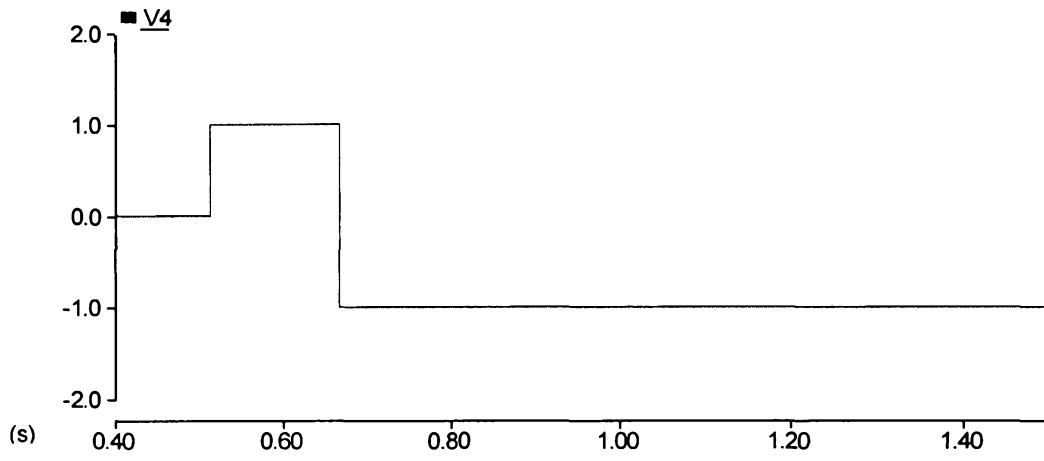


Figura 8

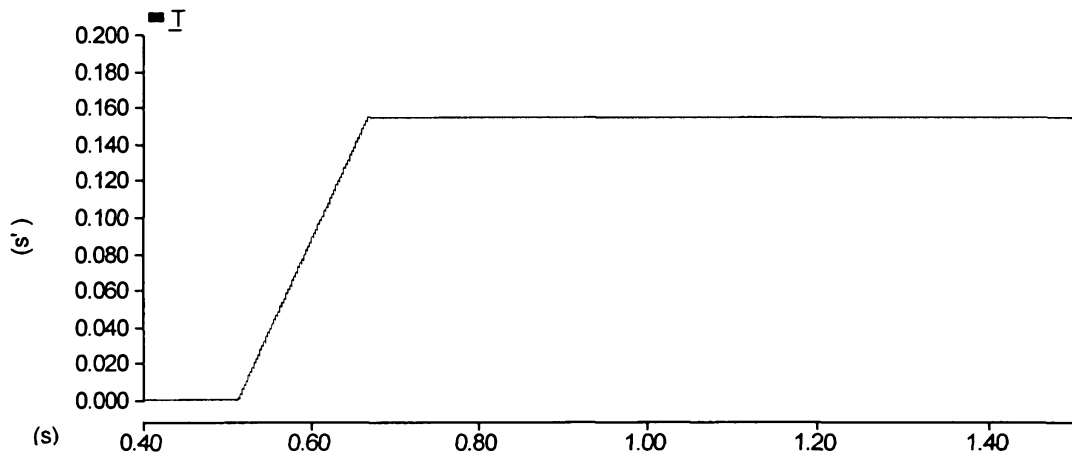


Figura 9