



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

GPC 05  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO V**

### **GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

#### **AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS NUMÉRICOS DE PROTEÇÃO PARA LINHAS COM CAPACITOR SÉRIE CONTROLADO POR TIRISTOR (TCSC)**

**Luis Fabiano dos Santos \***

**ABB**

**Paulo Márcio da Silveira**

**UNIFEI**

**Ricardo Tenório**

**ONS**

## **RESUMO**

Este artigo está focado na análise de algoritmos numéricos de proteção aplicados em linhas de transmissão com compensação série. Particularmente, procura avaliar o comportamento de algoritmos numéricos de proteção na presença da compensação série variável, com o uso do Capacitor Série Controlado por Tiristor, ou TCSC do inglês Thyristor Controlled Series Capacitor.

São avaliados tanto algoritmos numéricos de distância, como algoritmos de diferencial de linha. Duas aproximações foram utilizadas para cada caso. Para a proteção de distância foram desenvolvidas rotinas matemáticas baseadas no Filtro Discreto de Fourier de Ciclo Completo e no Filtro baseado em Modelo de Equação Diferencial da linha de transmissão. No que se refere à proteção de diferencial de linha a simulação das rotinas dos algoritmos numéricos é apresentada no plano cartesiano e no plano alfa, sendo ambas baseadas no Filtro Discreto de Fourier de Ciclo Completo.

A principal tarefa é, portanto, a tentativa de reproduzir alguns dos cálculos internos, ou algoritmos de proteção, usados em dispositivos reais disponíveis no mercado e seus comportamentos perante uma linha de transmissão que apresenta o capacitor controlado a tiristor. O trabalho além de fornecer um melhor entendimento das rotinas internas realizadas pelos relés numéricos, permite através das simulações e resultados apresentados uma oportunidade de melhor entendimento acerca do comportamento e fenômenos associados aos transitórios em linhas com compensação série, neste caso com a utilização do TCSC.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Proteção de linhas, algoritmos numéricos, compensação série, TCSC

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

Quando se estuda a aplicação de capacitores série em linhas de transmissão observa-se que a história se inicia cerca de 80 anos atrás, quando então os engenheiros já se viam forçados a aumentar cada vez mais a capacidade de transmissão de energia em longas distâncias e corredores. No entanto, como era de se esperar, problemas para o controle de potência reativa surgiram, uma vez que a tensão no lado da recepção se tornava fora dos limites durante condições de máximo carregamento. A solução veio com a aplicação de bancos de capacitores série no corredor de transmissão. Desde então o uso da compensação série tem aumentado tanto em tamanho como no tipo de aplicação, possibilitando melhorar a capacidade de transmissão e melhorar a estabilidade do sistema, entre outros.

Mais recentemente a aplicação do capacitor série passou a contar com o recurso de controle através de tiristores, permitindo que o capacitor série pudesse ser controlado, sendo sua reatância variável no tempo. Neste contexto, o Capacitor Série Controlado por Tiristor, ou TCSC, tem ocupado grande importância em alguns sistemas de potência ao redor do mundo.

No entanto, independente de seu tamanho ou aplicação, uma proteção apropriada da linha de transmissão deve ser provida, sendo as faltas ao longo da linha identificadas e eliminadas corretamente. Adicionalmente, o uso de capacitores série pode não estar restrito a uma determinada linha de transmissão, mas pode ser aplicado em outras partes do sistema, na vizinhança de uma linha de transmissão a ser protegida. Novamente a proteção de linha deve ser capaz de operar corretamente para esta condição.

Por outro lado o conceito de uso de computadores digitais para aplicações em proteção surgiu há cerca de 40 anos atrás. Desde então um rápido desenvolvimento nesta área pôde ser observado e atualmente sua aplicação é essencial em modernos esquemas de proteção e arquiteturas de automação de subestações. Na verdade, os dispositivos numéricos são hoje preferencialmente utilizados levando-se em conta tantos os aspectos técnicos quanto econômicos. Entre várias características, os relés de proteção numéricos podem apresentar auto supervisão, flexibilidade funcional, e mais recentemente recursos adaptivos, além de serem facilmente integrados em sistemas de automação de subestações.

Neste artigo a tarefa principal é tentar reproduzir alguns dos cálculos internos, ou algoritmos, realizados por relés de proteção numéricos disponíveis comercialmente, possibilitando desta forma um melhor entendimento das rotinas e funcionalidades realizadas internamente por estes dispositivos. Por outro lado, o artigo permite também um melhor entendimento do comportamento e fenômenos associados aos transitórios em redes com compensação série. Deve-se mencionar, no entanto, que apesar de diferentes simulações, filosofias e situações para linhas não compensadas e linhas compensadas terem sido testadas apenas uma pequena parte dos resultados é aqui apresentada, tendo em vista que um grande número de cenários e possibilidades podem ocorrer.

## 2.0 - ALGORITMOS NUMÉRICOS

Para que seja possível analisar e avaliar o comportamento de relés numéricos de proteção deve-se implementar alguns dos cálculos matemáticos, ou rotinas, que estes dispositivos realizam internamente. Estes cálculos são conhecidos como algoritmos numéricos, ou filtros digitais, e são responsáveis pela estimativa de parâmetros elétricos necessários para fornecer ao relé as referências para sua operação, ou seja, sua decisão ou não de disparo.

Dentre os diversos tipos de algoritmos disponíveis foram escolhidos os algoritmos baseados no Filtro Discreto de Fourier de Ciclo Completo, ou DFT Ciclo Completo, e no Modelo de Equação Diferencial da linha de transmissão, ambos implementados para a verificação da proteção de distância. Para a proteção diferencial de linha foi utilizado o Filtro Discreto de Fourier de Ciclo Completo, porém em duas diferentes aproximações: o plano cartesiano e o plano alfa.

O artigo não apresenta, no entanto, nenhuma teoria ou descrição acerca da proteção de distância e da proteção diferencial de linha, uma vez que estes conceitos e idéias podem ser encontrados em diferentes publicações disponíveis. Da mesma maneira, diversos outros filtros podem ser encontrados com aplicação na estimativa de parâmetros elétricos para uso em proteção de sistemas elétricos, tais como: algoritmo de Mann-Morrisson, Filtro Discreto de Fourier de Meio Ciclo, Filtro Trigonômicos (Filtros Seno e Cosseno), Filtros de Mínimos Quadrados, Filtro de Kalman, não sendo também estes filtros abordados neste trabalho.

### 2.1 Filtro Discreto de Fourier de Ciclo Completo

Este é provavelmente o algoritmo numérico mais utilizado e implementado para propósitos de proteção, tanto no que se refere a produtos disponíveis comercialmente quanto em desenvolvimentos acadêmicos. Esta técnica, desenvolvida a partir da Transformada Discreta de Fourier, permite que usuário determine o conteúdo espectral de um sinal periódico no tempo. No Filtro Discreto de Fourier de Ciclo Completo, ou seja, com uma janela retangular de comprimento de um ciclo da componente fundamental, usando N amostras por ciclo, [(N/2)-1] harmônicos podem ser extraídos. As componentes fasoriais (frequência fundamental) podem ser expressas por (1) e (2):

$$Y_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (1)$$

$$Y_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \sin\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad (2)$$

O Filtro Discreto de Fourier de Ciclo Completo apresenta boa resposta transitória e rejeição de harmônicos. Porém, é bastante sensível para componentes não harmônicos, e irá levar pelo menos um ciclo da frequência fundamental para atingir a condição de regime permanente.

## 2.2 Modelo de Equação Diferencial

Este tipo de algoritmo é baseado em modelo do sistema, ao invés de modelo do sinal como previamente mostrado pelo algoritmo de Fourier. Utilizando este tipo de cálculo a estimativa dos parâmetros de linha é feita através da solução da equação diferencial que representa a linha de transmissão, levando-se em conta os valores de  $i(t)$  e  $v(t)$ , conforme a equação (3):

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

Deve ser observado que tanto a corrente quanto a tensão podem ser medidas, mas não é possível medir os valores da derivada da corrente. Os algoritmos baseados na solução de equação diferencial são então tipicamente classificados em dois grupos, os quais identificam o método usado para eliminar a medição da derivada da corrente. Estes dois grupos podem ser mencionados como:

- ❑ Eliminação da derivada por integração
- ❑ Aproximação da derivada usando amostras

Dependendo do método usado, a estimativa dos parâmetros pode ser obtida através do uso de três amostras de corrente e três amostras de tensão apenas, tornando este algoritmo mais rápido que outros, embora esta pequena janela de dados possa ser interpretada como não seletiva se comparada a outros.

No entanto, uma das grandes vantagens deste algoritmo é sua habilidade em reconhecer a componente contínua DC existente na corrente de falta, uma vez que o modelo baseado em equação diferencial prevê esta componente. Assim, o algoritmo irá interpretar a componente DC como parte da solução da equação diferencial, não sendo necessário seu tratamento e processamento como um transitório não esperado. No entanto, deve ser mencionado que este modelo não contém as capacitâncias em derivação da linha de transmissão, e um cuidado adicional deve ser tomado para linhas longas.

## 3.0 - CAPACITOR SÉRIE CONTROLADO POR TIRISTOR (TCSC)

O Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC – “Thyristor Controlled Series Capacitor”) é uma tecnologia já estabelecida que combina capacitores série convencionais com o reator controlado a tiristor (TCR-“Thyristor Controlled Reator”) de tal forma a permitir o controle contínuo da impedância do TCSC. O TCSC é um dos controladores FACTS (“Flexible AC Transmission System”) que oferecem flexibilidade de operação, melhor utilização dos sistemas de potência e melhoramento da estabilidade sem o risco da ocorrência de ressonância subsíncrona [8, 9, 10].

Um diagrama simplificado da modelagem do TCSC desenvolvida para o programa ATP-EMTP é mostrado na Figura 1. Uma descrição detalhada desta modelagem pode ser encontrada em [8, 9]. O TCSC foi dividido em três sistemas distintos: circuito de potência, sistemas de medição e controle; sistemas de sincronização e disparo.

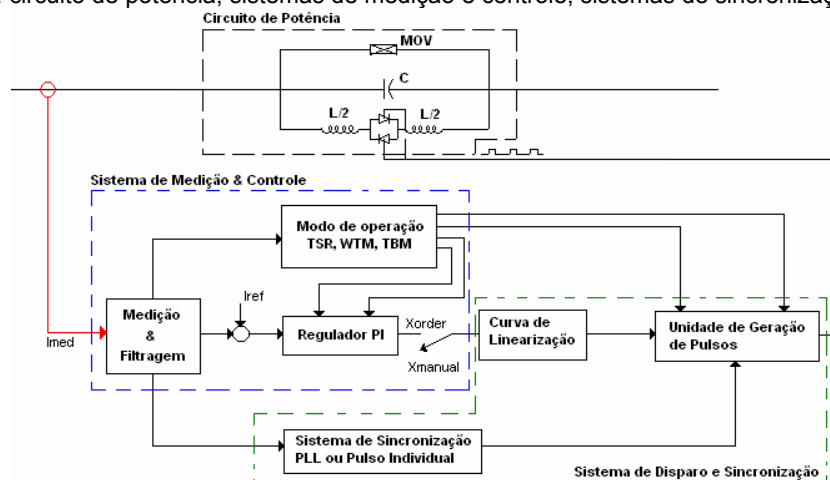


Figura 1: Modelo do Capacitor Série Controlado por Tiristor (TCSC)

O circuito de potência é composto por um banco de capacitor em paralelo com um reator controlado por tiristores e um varistor de óxido metálico (MOV-“Metal Oxide Varistor”) para proteção do capacitor. A válvula de tiristores também inclui circuitos “snubber”. Todos os componentes foram modelados usando os modelos convencionais disponíveis no ATP-EMTP.

Os sistemas de medição e controle trabalham independentemente em cada fase e consistem de filtros passa-faixa e “notch” (rejeita-faixa), um dispositivo de medição quadrática de corrente e um controlador proporcional-integral (PI). Uma comparação entre a corrente de linha medida e a corrente de referência ajustada é feita, sendo então gerado um erro que é a entrada do controlador PI, cuja principal função é trazer para zero o erro de regime permanente. Existe um modo de controle de impedância em malha aberta em adição ao modo de controle de corrente em malha fechada. Neste modo de controle de impedância em malha aberta, uma ordem de reatância é ajustada e o sistema de disparo fornece um ângulo de disparo apropriado para os tiristores.

Os sistemas de disparo e sincronização consistem de uma curva de linearização, uma unidade geradora de pulsos e de uma unidade de sincronização que funciona baseada em : (i) pulsos de disparo individual (cruzamento dos zeros de corrente) e (ii) PLL (“Phase Locked Loop”). Todos os blocos de sistemas de controle/medição e sincronização e disparo foram modelados usando ATP-TACS (Transient Analysis of Control System).

Existem três modos especiais de operação: modo de inserção plena (TSR - “thyristor switched reactor”), modo de tiristores bloqueados (TBM - “thyristor blocked mode”) e modo de espera (WTM - “waiting mode”). Esses modos de operação são ativados em circunstâncias especiais pelo seletor de modos de operação. No modo TSR os tiristores estão conduzindo plenamente. Nesta condição o banco de capacitores é “bypassado” pelo TCR e a impedância do TCSC varia rapidamente de um valor capacitivo para um valor indutivo. Isto fornece o meio necessário para limitar as correntes de linha através do aumento da impedância série da linha de um valor que depende do projeto do TCSC. No modo de espera o TCSC aguarda por um certo tempo (ajustável) com um ângulo de disparo fixo até que um outro modo de operação seja requerido. O modo de tiristores bloqueados ocasiona o bloqueio do controlador PI e do sistema de disparo e o TCSC operará com o ângulo de disparo em  $180^\circ$ , isto é, apenas como um banco de capacitores série fixo. O modo de espera funciona na reinserção do TCSC após distúrbios no sistema de transmissão ajudando a eliminar a carga residual (“trapped charge”) do banco de capacitores série do TCSC.

#### 4.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A fim de verificar o comportamento dos algoritmos de proteção torna-se importante a definição de um sistema de potência para a simulação de diferentes condições de falta. A Figura 2 apresenta o modelo de sistema de potência adotado. A linha de transmissão é modelada como um típica linha de 440kV, com parâmetros distribuídos, sendo este sistema modelado no programa ATP. Este sistema é constituído de uma linha de transmissão que apresenta no terminal do lado da Barra A um capacitor série fixo com grau de compensação de 25% e um TCSC com grau de compensação de 5%-15%, e no lado da Barra B um capacitor série fixo com grau de compensação de 30%.

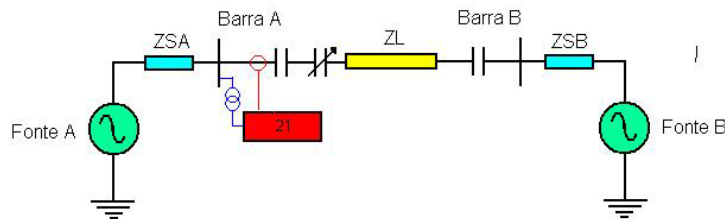


Figura 2: Modelo simplificado do sistema de potência

Nas simulações foi considerado o modelo descrito no item 3.0. O TCSC foi simulado no modo de controle de corrente em malha fechada. Também foram consideradas duas variantes: a primeira delas com o modo TSR desativado, TSROFF, e o comportamento esperado é bem similar ao de um capacitor série fixo para feitos de falta interna no sistema. Na segunda variante, o modo TSR é ativado, TSRON, havendo o bypass pelo reator controlado a tiristores quando a corrente for elevada (condição de falta interna no sistema).

##### 4.1 Modo TSR Desativado

A Figura 3 apresenta o comportamento das trajetórias de impedância tanto para o algoritmo de distância baseado no Filtro de Fourier de Ciclo Completo quanto para o algoritmo baseado em Modelo de Equação Diferencial, para

uma falta trifásica, sem resistência de falta, a uma distância de 25% do trecho de linha a partir da Barra A do sistema de potência apresentado na Figura 2. Pode ser observado que o modelo baseado em equação diferencial apresenta uma convergência mais rápida desde o ponto de carga até o ponto de falta.

No modo TSR desativado não existe influência do TCSC na medição de impedância. Desta forma, o comportamento da trajetória de impedância é similar a uma linha com capacitor série fixo. Observa-se, portanto, um ligeiro aumento do valor de resistência de falta medido pelo algoritmo causado pela presença do dispositivo MOV de proteção do banco de capacitores. Adicionalmente, a presença do dispositivo MOV diminui a oscilação da trajetória.

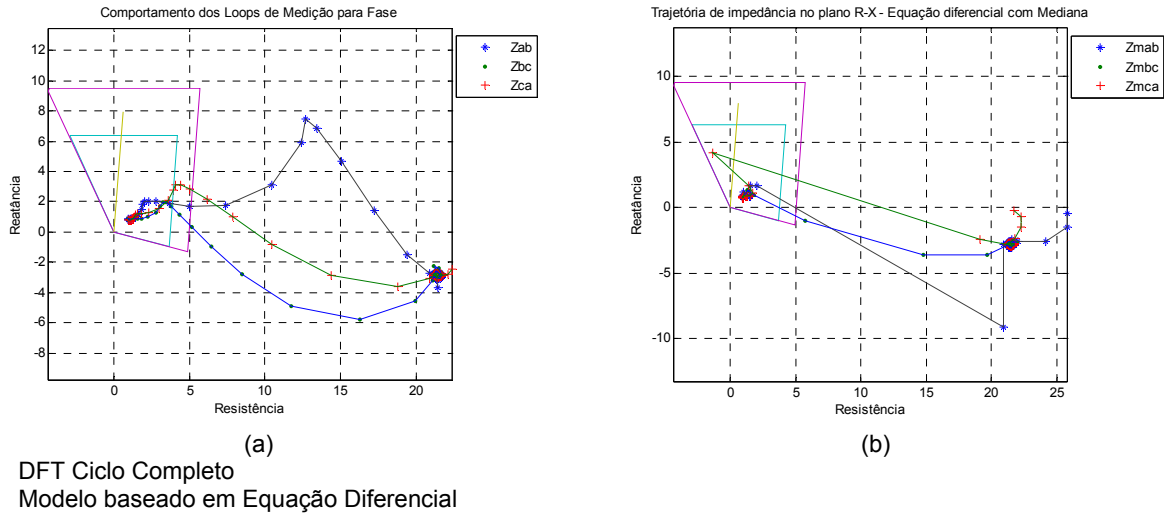


Figura 3: Trajetória de impedâncias para falta a 25% do trecho da linha, TSROFF

A Figura 4, por outro lado, apresenta o comportamento dos elementos diferenciais para a mesma falta avaliada pelo algoritmo de distância. Os algoritmos diferenciais são baseados no filtro de DFT de Ciclo Completo, porém duas abordagens distintas são apresentadas: plano cartesiano e plano alfa. Pode ser observado através da Figura 4 que ambos os elementos apresentam medição correta para a falta em análise.

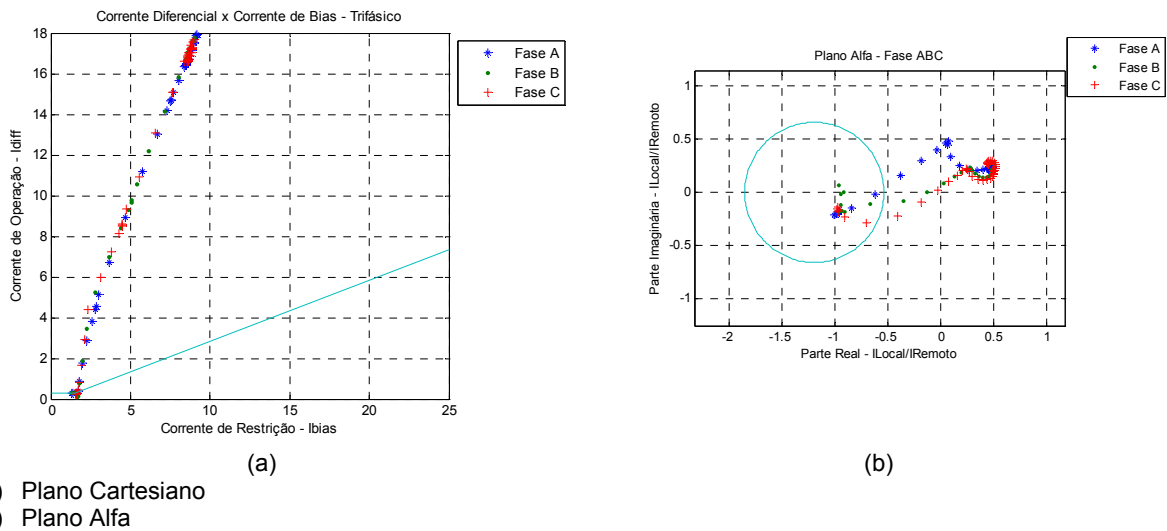


Figura 4: Comportamento do elemento diferencial para falta a 25% do trecho da linha, TSROFF

A Figura 5 apresenta o comportamento das trajetórias de impedância para uma trifásica, sem resistência de falta, a uma distância de 100% do trecho de linha a partir da Barra A. Observa-se, neste caso, uma menor influência do dispositivo MOV do capacitor local para uma falta no terminal remoto no algoritmo de proteção. Assim, a trajetória de impedância apresenta uma pequena oscilação no ponto de convergência da impedância de falta devido ao efeito transitório apresentar a interação de energia entre o capacitor série e a linha de transmissão. Observa-se ainda que o valor de resistência de falta observado na Figura 3 não está mais presente.

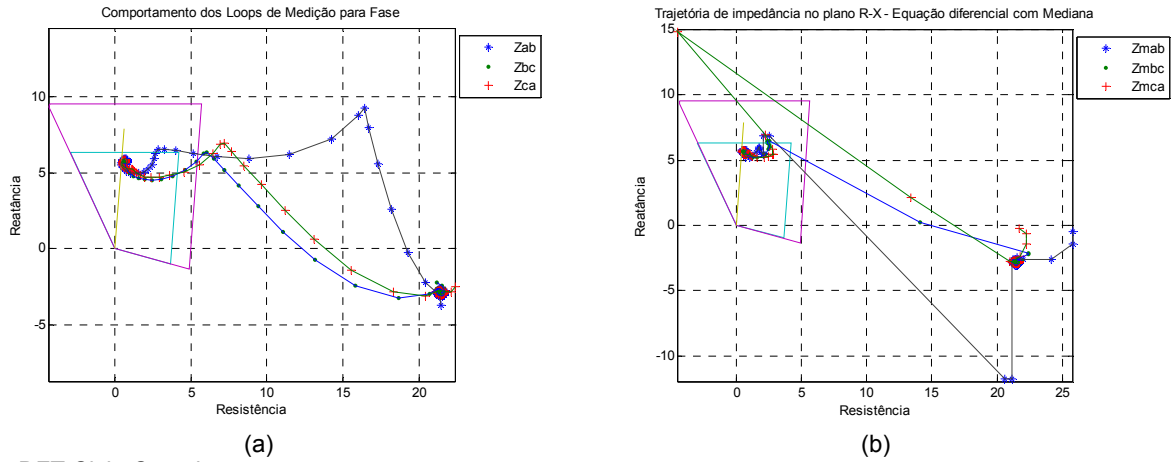


Figura 5: Trajetória de impedâncias para falta a 100% do trecho da linha, TSROFF

Os elementos diferenciais são também avaliados para uma falta a 100% do trecho da linha, conforme Figura 6. Deve-se mencionar que esta falta é considerada no terminal remoto em relação a Barra A, porém interna à zona de proteção dos elementos diferenciais, ou seja, entre os transformadores de corrente que definem a região de proteção. Neste caso, os elementos diferenciais medem corretamente a falta, e as amostras alcançam de maneira satisfatória a região de operação.

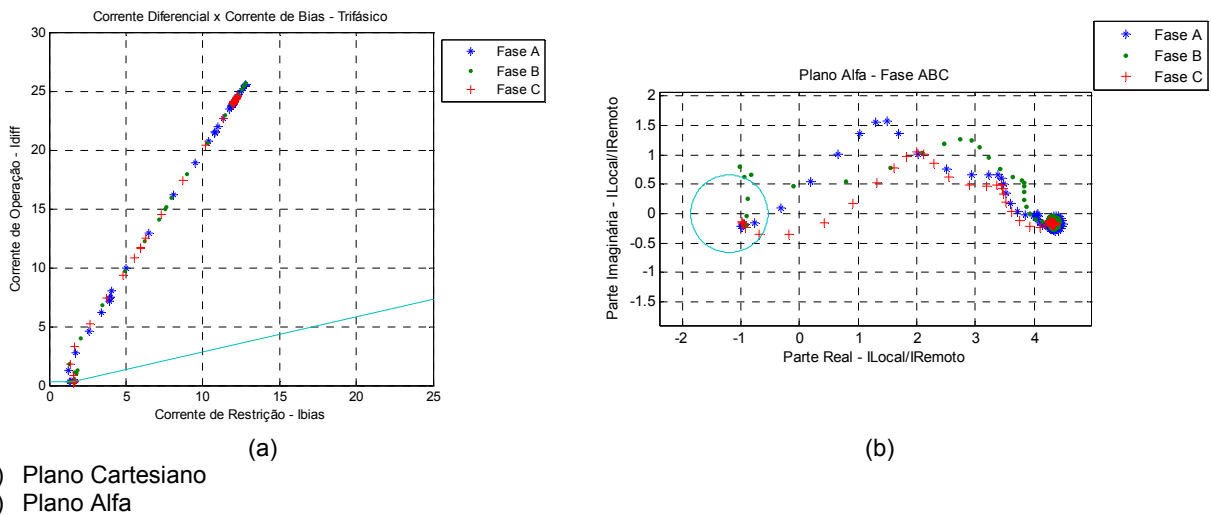
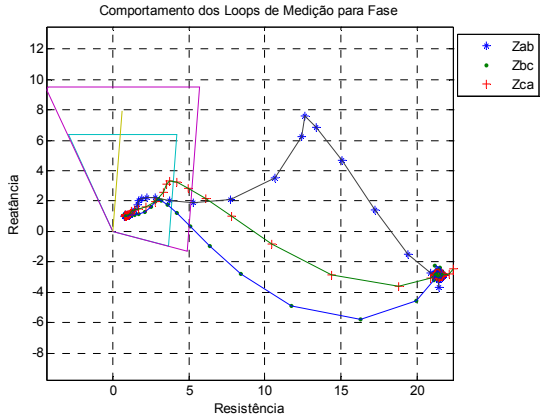


Figura 6: Comportamento do elemento diferencial para falta a 100% do trecho da linha, TSROFF

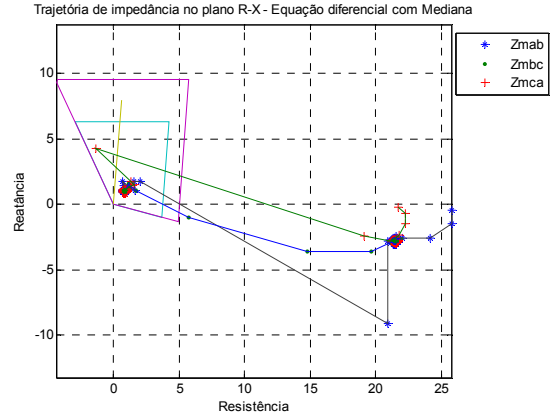
#### 4.2 Modo TSR Ativado

No modo TSR ativado os tiristores são chaveados de maneira automática, em condições especiais, quando a corrente da linha é elevada o suficiente para ocasionar sobretensão no banco de capacitor. A Figura 7 apresenta o resultado do comportamento das trajetórias de impedância para uma falta a 25% do trecho de linha. Observa-se, neste caso, que não existe grande influência do TCSC na medição dos algoritmos, principalmente pelo fato do nível de curto circuito ser elevado, causando atuação do dispositivo MOV.

Para os algoritmos diferenciais de linha não são também observados desvios das amostras, e uma operação confiável é obtida para a falta a 25% do trecho de linha, conforme a Figura 8. Por outro lado, pode ser observado, através da Figura 9, que os algoritmos de distância apresentam um erro elevado para faltas a 100% do trecho da linha, ou seja, faltas distantes do ponto de medição do relé de proteção. Neste caso, a atuação do TCSC aumenta o desvio da convergência final do valor de impedância, podendo resultar em atuação indevida dos elementos de distância. Observa-se ainda que o erro apresentado pelo algoritmo DFT de Ciclo Completo é maior que o erro apresentado pelo algoritmo baseado em Modelo de Equação Diferencial.



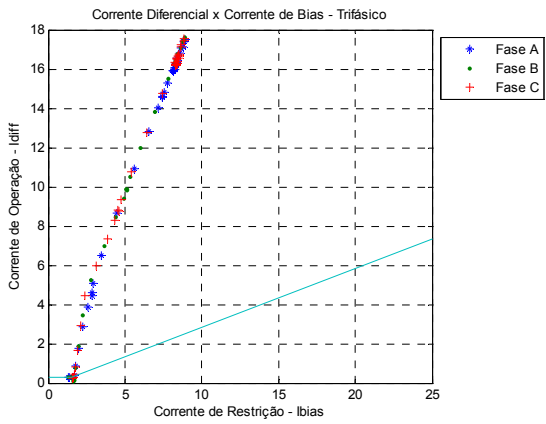
(a)



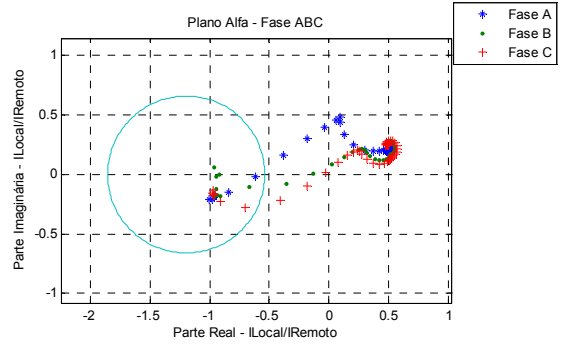
(b)

- (a) DFT Ciclo Completo
- (b) Modelo baseado em Equação Diferencial

Figura 7: Trajetória de impedâncias para falta a 25% do trecho da linha, TSRON



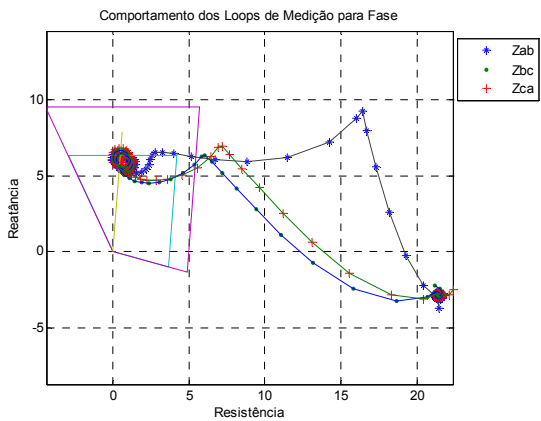
(a)



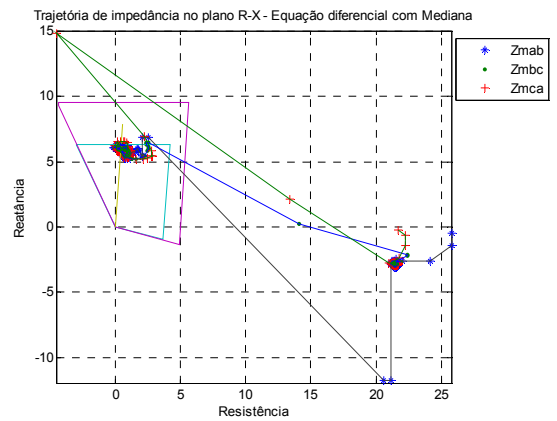
(b)

- (a) Plano Cartesiano
- (b) Plano Alfa

Figura 8: Comportamento do elemento diferencial para falta a 25% do trecho da linha, TSRON



(a)

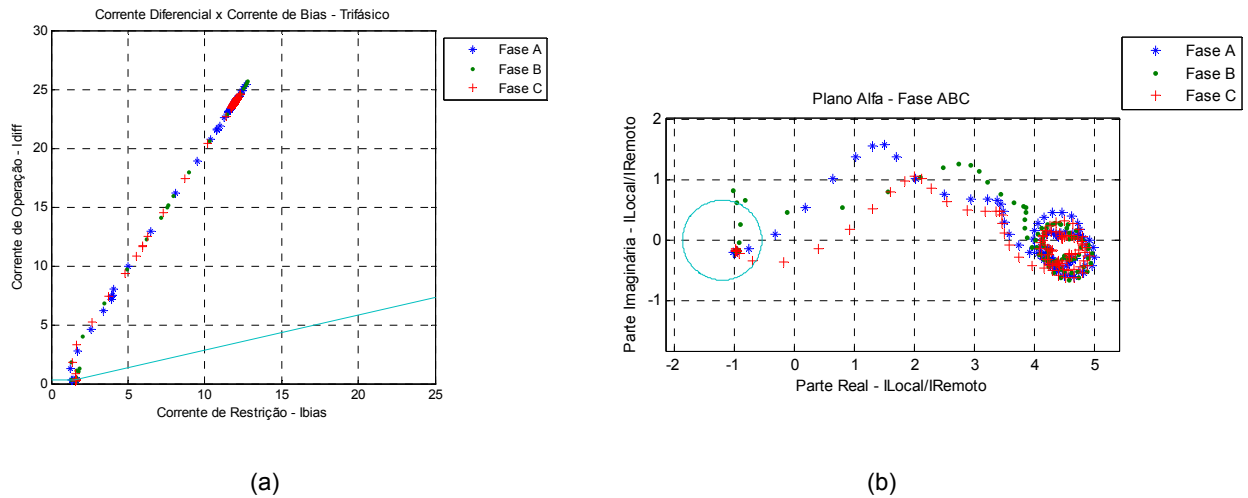


(b)

- (a) DFT Ciclo Completo
- (b) Modelo baseado em Equação Diferencial

Figura 9: Trajetória de impedâncias para falta a 100% do trecho da linha, TSRON

A Figura 10 apresenta o comportamento dos elementos diferenciais para a falta o terminal remoto. Novamente os elementos diferenciais atuam de maneira satisfatória, havendo apenas um maior desvio de amostras no modelo representado pelo plano alfa, porém sem comprometimento da operação da proteção diferencial.



(a) Plano Cartesiano  
(b) Plano Alfa

Figura 10: Comportamento do elemento diferencial para falta a 100% do trecho da linha, TSRON

## 5.0 - CONCLUSÃO

O artigo apresentou uma avaliação de algoritmos numéricos de proteção para linhas com capacitor série controlados por tiristor. Dois diferentes algoritmos de proteção de distância foram analisados: Filtro Discreto de Fourier de Ciclo Completo e Filtro baseado em Modelo de Equação Diferencial. Foi adicionalmente avaliado o comportamento de algoritmos de proteção diferencial de linha, também em duas diferentes representações: Plano Cartesiano e Plano Alfa. Neste contexto, foi possível observar que o algoritmo de distância baseado em Modelo de Equação Diferencial apresentou melhor rendimento tanto no aspecto de velocidade, quanto no que se refere ao reconhecimento da componente aperiódica e que os elementos de proteção diferencial apresentaram melhor desempenho geral se comparados aos elementos de proteção de distância.

A avaliação dos algoritmos numéricos de proteção para uma linha com Capacitor Série Controlado por Tiristor possibilitou avaliar como este dispositivo pode levar a erros de medição. Em particular, foi possível observar que o disparo dos tiristores do TCSC, para determinadas condições de falta, aumentaram a dispersão dos pontos de medição de impedância na convergência final do ponto de falta. Este fenômeno deve ser conhecido e considerado pelos engenheiros de proteção, uma vez que pode alterar substancialmente o comportamento esperado de medição.

## 6.0 - REFERÊNCIAS

- [1] L.Fabiano, P.M.Silveira, "Evaluation of Numerical Distance Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines", IEEE T&D Latin America, Caracas, 2006.
- [2] L.Fabiano, P.M.Silveira, "Evaluation of Numerical Current Differential Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines", IEEE T&D Latin America, Caracas, 2006.
- [3] A.G.Phadke, J.S.Thorp, "Computer Relaying for Power Systems" Research Studies Ltd., Taunton, Somerset, England, 2000.
- [4] M.Akke, J.S.Thorp, "Improved Estimates from the Differential Equation Algorithm by Median Post Filtering", Developments in Power System Protection, 25-27th March 1997, IEE, 1997.
- [5] M.Akke, J.S.Thorp, "Some improvements in the Three Phase Differential Equation Algorithm for Fast Transmission Line Protection", Sydkraft AB & Cornell University.
- [6] Tenório, A.R.M.; "A Thyristor Controlled Series Capacitor Model for Electromagnetic Transient Studies"; Dept. of Electrical Engineering & Electronics, Tese de Mestrado, UMIST, Manchester, UK, 1995.
- [7] Tenório, A.R.M.; Jenkins, N.; Bollen, M.H.J.; "A TCSC Model for Electromagnetic Transient Studies"; Stockholm Power Tech - International Symposium on Electric Power Engineering, Estocolmo, Junho 18-22, 1995, Power Electronics proceedings pp. 130-135.
- [8] Tenório, A.R.M.; "Comparação Entre o TCSC e o Capacitor Série Convencional: O Problema da Ressonância Subsíncrona"; XII ERLAC, CE-38, Puerto Iguazú, Argentina, 1997.