



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

GPC 20  
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**

### **BIBLIOTECA DE MODELOS DINÂMICOS DE RELÉS DE PROTEÇÃO PARA USO COM O MATLAB/SIMULINK**

**Newton José de Salles \***

**Walmir de Freitas Filho**

**Luiz Carlos Pereira da Silva**

**CPFL**

**FEEC/UNICAMP**

**FEEC/UNICAMP**

## RESUMO

Inquestionavelmente, a plataforma Matlab/Simulink será cada vez mais utilizada na área de análise e simulação de sistemas elétricos de potência. Isso pode ser constatado pelo número de programas específicos para análise de sistemas de potência que permitem integração direta com o Matlab/Simulink. Alguns exemplos destes programas são o PSCAD/EMTDC, o DigSILENT PowerFactory e o EMTP-RV.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma nova biblioteca de modelos dinâmicos de relés digitais de proteção para uso com o Matlab/Simulink. Modelos funcionais de diversos relés foram desenvolvidos, os quais podem ser empregados em conjunto com programas de análise de transitórios eletromagnéticos, assim como para investigar detalhadamente o comportamento dos relés usando dados oscilografados em campo ou gerados por programas computacionais com o uso do formato COMTRADE.

## PALAVRAS-CHAVE

Biblioteca, Modelos, Relés, Proteção, Matlab/Simulink.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma biblioteca de modelos dinâmicos para representar os principais relés empregados em sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica (1). Os modelos desenvolvidos são adequados para utilização juntamente com programas de simulação de transitórios eletromagnéticos de sistemas de potência (simulação com realimentação (2) – *closed loop*), para verificar a influência do sistema de proteção no desempenho da rede, ou independentemente (simulação sem realimentação (2) – *open loop*), para investigar os algoritmos empregados no relé ou para validar os modelos desenvolvidos. Os modelos foram desenvolvidos para uso no ambiente Matlab/Simulink. Conseqüentemente, estes modelos podem ser utilizados com diversos programas de simulação de transitórios eletromagnéticos tais como o PSCAD/EMTDC, o SimPowerSystems e o ATP (3).

A complexidade adotada para representar os diversos tipos de relés foi decidida tendo-se em mente que tais modelos devem ser precisos o suficiente para desenvolvimento de pesquisas na área de proteção de sistemas de distribuição e subtransmissão; porém, simples o suficiente para que eles possam ser utilizados para ensino da teoria de sistemas de proteção em nível de graduação e pós-graduação.

Na Figura 1, apresenta-se a biblioteca de modelos de relés digitais de proteção desenvolvida neste trabalho (*PROTECTIONLIB*). Os principais relés que foram modelados são os seguintes:

- Relé de sobrecorrente de fase, instantâneo e temporizado (50/51);
- Relé de sobrecorrente de terra, instantâneo e temporizado (50/51N);

- Relé de sobrecorrente de fase com restrição de tensão (51V);
- Relé de sobrecorrente direcional (67);
- Relé de sobrecorrente de seqüência negativa (46);
- Relés de subtensão e sobretensão (27/59);
- Relé de sobretensão de seqüência zero (59N);
- Relé de subfreqüência e sobrefreqüência (81);
- Relé de distância de fase (21).

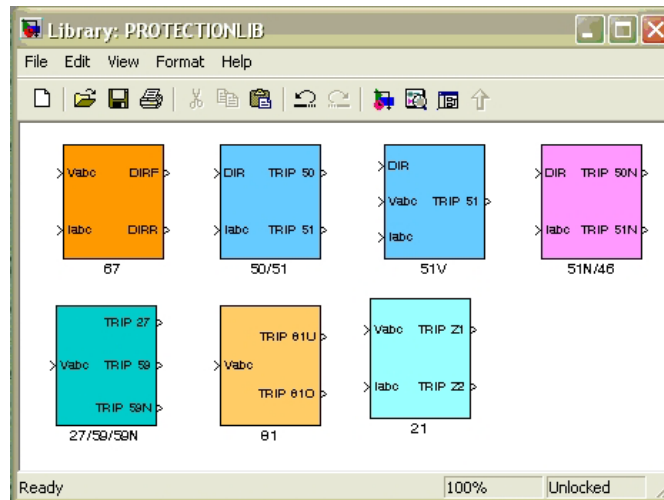


FIGURA 1 – Biblioteca de modelos de relés digitais de proteção

Os modelos desenvolvidos foram validados através da comparação dos resultados obtidos por simulação com o comportamento de relés comerciais. Adicionalmente, tal validação dos modelos foi realizada através de duas metodologias. Na primeira metodologia, dados obtidos em campo através de oscilografias de relés foram utilizados como entrada para os modelos desenvolvidos. Então, o comportamento do relé comercial foi comparado com o comportamento do modelo simulado. Na segunda metodologia, os dados de tensão e corrente foram gerados utilizando-se o ATP. Então, tais dados foram utilizados para verificar o comportamento de um relé comercial, através do uso de caixa de teste, e do relé simulado. Os resultados comprovam que os modelos desenvolvidos são suficientemente precisos para determinar o comportamento de relés comerciais operando em campo.

A aplicação dos modelos desenvolvidos é analisada através da simulação dinâmica de diferentes perturbações em uma rede de subtransmissão. Contudo, destaca-se que tais modelos podem ser utilizados para investigar diferentes problemas relacionados com sistemas de proteção de redes elétricas. Adicionalmente, no futuro, espera-se que tais modelos possam ser utilizados para o desenvolvimento de novas lógicas e algoritmos de proteção, bem como contribuir com o ensino de proteção de sistemas elétricos.

## 2.0 - MODELAGEM DINÂMICA DE RELÉS DE PROTEÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os modelos funcionais de relés digitais de proteção que correspondem às funções ANSI: 50/51, 51N, 46, 67 e 21. A modelagem detalhada dos demais relés digitais de proteção que compõe a biblioteca pode ser encontrada na referência (1). Destaca-se que todos os modelos desenvolvidos utilizam o filtro digital de Fourier de um ciclo, com 16 amostras por ciclo, para estimação dos fasores de tensão e corrente. O filtro digital de Fourier de um ciclo foi escolhido em razão da sua vasta aplicação em relés digitais de proteção utilizados em sistemas de distribuição e subtransmissão.

### 2.1 Modelo de Relé Digital de Sobrecorrente de Fase (50/51)

A aplicação de um relé digital de sobrecorrente pressupõe que todas as fases do circuito trifásico sejam protegidas, independente da fase defeituosa. Assim sendo, foi desenvolvido um modelo de relé digital de sobrecorrente trifásico cuja representação é mostrada na Figura 2. O relé possui uma entrada de corrente trifásica,

uma entrada de controle direcional, uma saída de disparo temporizado (função 51) e uma saída de disparo instantâneo (função 50) com tempo definido ajustável.

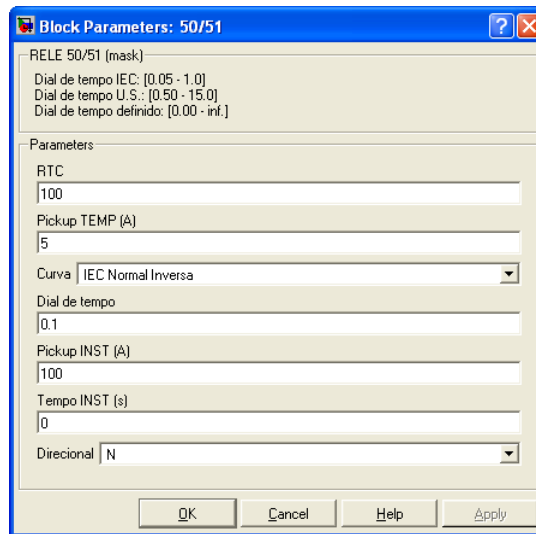


FIGURA 2 – Máscara com os ajustes do relé digital de sobrecorrente de fase

O diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente trifásico é mostrado na Figura 3. Os sinais de corrente são escalonados e filtrados; o sinal de corrente trifásica é separado e enviado para o subsistema de detecção de sobrecorrente de cada fase, onde é extraído o fasor de frequência fundamental. O controle direcional será habilitado, se a opção “S” for escolhida para o parâmetro *Direcional*. Se a escolha for pela opção “N”, o controle direcional será desabilitado. Observar que a entrada de controle direcional será chaveada pelo bloco *Switch* para a entrada *Enable* (ativa para valores maiores que “0”) de cada um dos três subsistemas detectores de sobrecorrente, se o controle direcional for habilitado; se o controle direcional for desabilitado, a constante *DIR* assumirá valor igual a “1” e as entradas *Enable* serão ativadas.

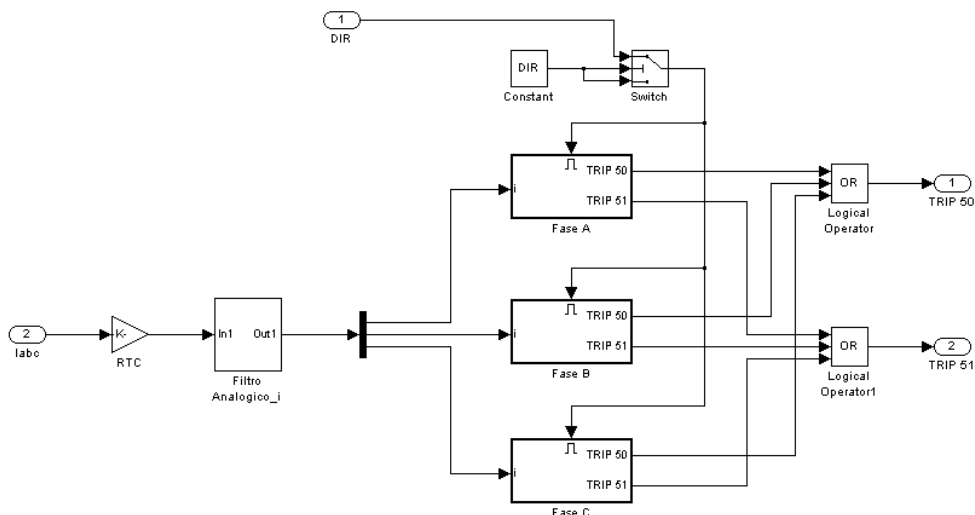


FIGURA 3 – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente de fase

## 2.2 Modelo de Relé Digital de Sobrecorrente de Terra e de Seqüência Negativa (51N/46)

A detecção de faltas à terra e de faltas desequilibradas exige um modelo de relé digital de sobrecorrente com características específicas, em razão da baixa intensidade de corrente que normalmente acompanham estes tipos de faltas. Logo, tornou-se necessário desenvolver um modelo de relé digital que incorporasse em um mesmo bloco as funções 51N e 46, deixando a cargo do usuário a opção de escolher entre uma ou outra função.

Os principais ajustes são os mesmos do relé digital de sobrecorrente de fase. A diferença está no parâmetro *51N/46*, que possibilita a escolha de uma das duas funções, conforme mostra a máscara de ajustes da Figura 4. Um aspecto importante é quanto às grandezas de operação do relé. A função 51N opera com corrente de

seqüência zero ( $3I_0$ ), enquanto que a função 46 opera com corrente de seqüência negativa ( $3I_2$ ). Ambas as correntes de seqüência são calculadas a partir dos fasores extraídos das correntes trifásicas.

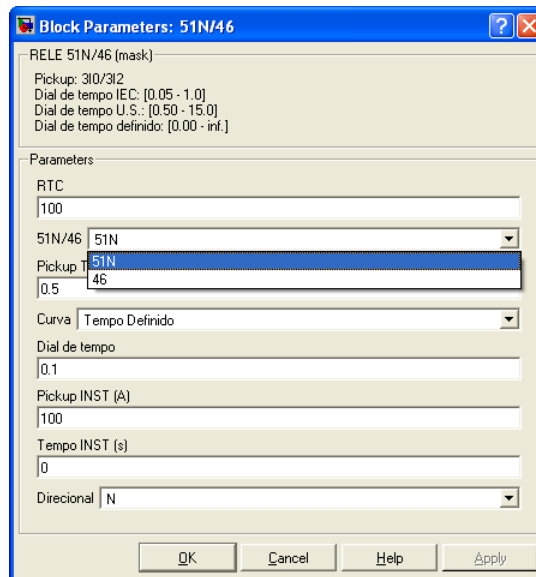


FIGURA 4 – Máscara com os ajustes do relé digital de sobrecorrente de terra e de seqüência negativa

### 2.3 Modelo de Relé Digital de Sobrecorrente Direcional (67)

A máscara com os ajustes do relé digital de sobrecorrente direcional, que utiliza o elemento direcional polarizado por tensão de seqüência positiva, para a discriminação da direcionalidade de faltas trifásicas, e o elemento direcional polarizado por tensão de seqüência negativa, para faltas desbalanceadas, é mostrada na Figura 5.

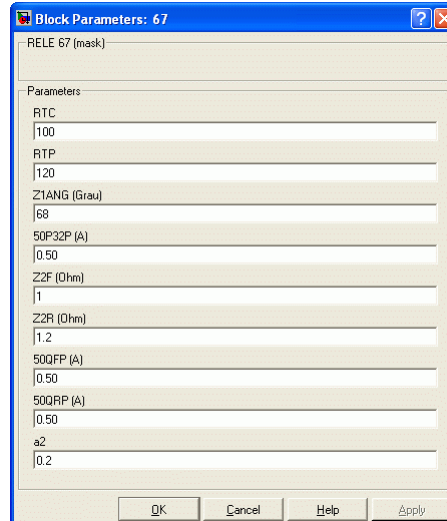


FIGURA 5 – Máscara com os ajustes do relé digital de sobrecorrente direcional

O modelo possui uma entrada de tensão trifásica,  $V_{abc}$ , e uma entrada de corrente trifásica,  $I_{abc}$ , ambas as entradas são vetores extraídos do circuito onde o relé é inserido. A saída  $DIRF$  irá para nível lógico alto, quando a falta estiver na direção à frente. Quando a falta estiver na direção reversa, a saída  $DIRR$  irá para nível lógico alto. As saídas direcionais irão para nível lógico baixo, se o elemento direcional não reconhecer a direção da falta. A Figura 6 mostra o diagrama de blocos do relé de sobrecorrente direcional, com as entradas de tensão e corrente, e as saídas direcionais. O bloco 32Q corresponde ao subsistema do elemento direcional de seqüência negativa. O bloco 32P corresponde ao subsistema do elemento direcional de seqüência positiva. Observa-se que a saída 32QE do bloco 32Q, quando em nível lógico alto, desabilitará o bloco 32P. Ou seja, na presença de faltas desbalanceadas o elemento direcional de seqüência positiva ficará fora de serviço. Os operadores lógicos OR

canalizam as saídas direcionais  $F32Q$  e  $F32P$  para a saída  $DIRF$ , assim como as saídas direcionais  $R32Q$  e  $R32P$  para a saída  $DIRR$ .

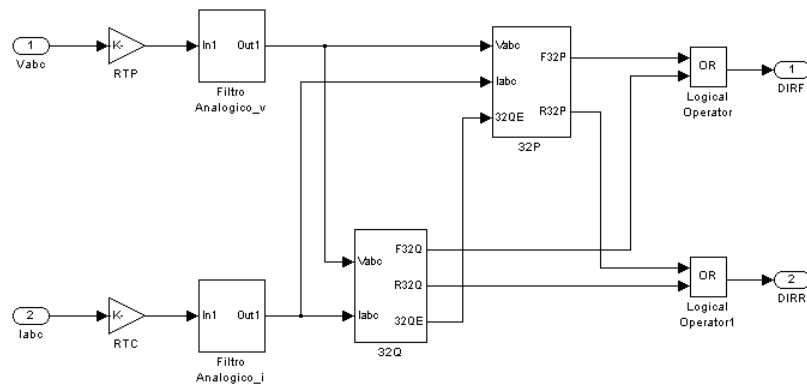


FIGURA 6 – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente direcional

#### 2.4 Modelo de Relé Digital de Distância de Fase (21)

Na proteção da interconexão de redes de distribuição com a geração distribuída de médio porte, a função 67 pode ser substituída pela função 21. A vantagem do uso da função 21 decorre de sua alta sensibilidade em detectar faltas entre fases, se comparada à função 67, ao mesmo tempo em que é praticamente imune à variação da corrente de carga. Assim, foi implementado um modelo de relé digital de distância de fase, com duas zonas de proteção e característica de operação do tipo MHO, que tem a finalidade de investigar a dinâmica da detecção de falta baseada na medição de impedância (4). Os principais ajustes dos elementos de distância, conforme mostra a máscara de ajustes da Figura 7, são os seguintes: *Polarização do Elemento MHO* (Autopolarizado ou Seqüência Positiva), *50PP1* (corrente de operação do elemento de zona 1), *50PP2* (corrente de operação do elemento de zona 2), *Alcance ZONA 1* (impedância do elemento de zona 1), *Tempo ZONA 1* (temporização da zona 1), *Alcance ZONA 2* (impedância do elemento de zona 2) e *Tempo ZONA 2* (temporização da zona 2).



FIGURA 7 – Máscara com os ajustes do relé digital de distância de fase

A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos do relé digital de distância. Os sinais de tensão e corrente são escalonados e filtrados; há um filtro *anti-aliasing* para tensão e outro para corrente. Os sinais filtrados são processados nos blocos dos subsistemas  $32P$  e  $32Q$ , para a composição dos elementos direcionais de seqüência positiva e negativa, e no bloco do subsistema *Fasores*, para a extração dos fasores das tensões e correntes de fase. No subsistema *ZM*, são processadas as lógicas de disparo dos elementos MHO de Zona 1 e Zona 2.

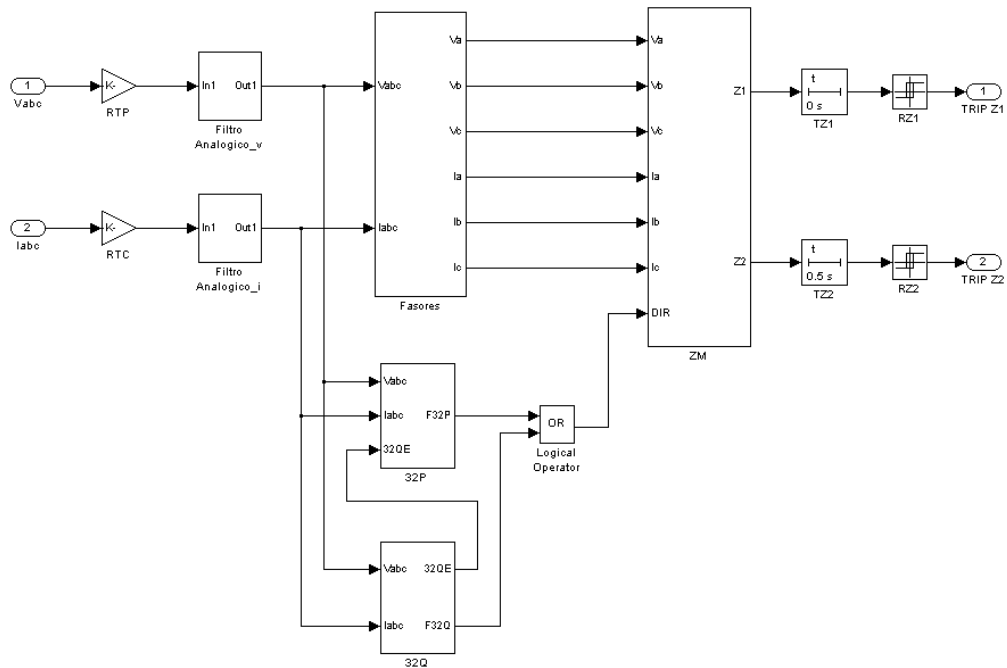


FIGURA 8 – Diagrama de blocos do relé digital de distância de fase

### 3.0 - VALIDAÇÃO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da validação do modelo de relé digital de sobrecorrente de terra e de seqüência negativa, com controle direcional, e do modelo de relé digital de distância de fase. Os demais modelos de relés digitais de sobrecorrente possuem o mesmo algoritmo gerador de curva de tempo, tornando-se desnecessária sua validação. A validação consiste em comparar o erro percentual relativo entre os tempos de atuação do modelo e de um relé digital do tipo multifunção comercial que utiliza uma variação do algoritmo de Fourier de um ciclo. Ambos os relés, o comercial e o modelo, foram parametrizados com os mesmos ajustes e submetidos às mesmas condições de falta (5).

#### 3.1 Validação dos Modelos de Relés Digitais de Sobrecorrente

##### 3.1.1 Relé Digital de Sobrecorrente de Terra

Uma alternativa a ter que simular faltas em um programa de transitórios eletromagnéticos, como o ATP, é coletar os registros de faltas do próprio relé comercial. Com isso, tem-se uma boa base de comparação, pois são conhecidas todas as informações a respeito da evolução da falta, da operação dos elementos de proteção e do tempo de atuação do relé. A Figura 9 mostra os sinais de tensões e correntes que foram aplicados no modelo computacional de relé digital de sobrecorrente de terra com controle direcional (67+51N).

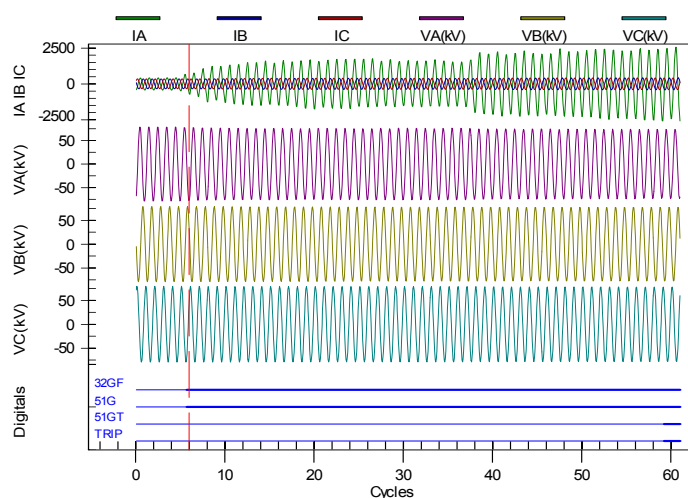


FIGURA 9 – Oscilograma de uma falta à terra com resistência de arco

Os registros foram coletados do relé comercial e representam uma falta da fase “A” para a terra, com resistência de arco, em uma linha de transmissão de 138 kV. A falta provocou a operação do elemento 51G (função 51N) em 94,8 ms, sendo eliminada em 986,5 ms pela atuação do elemento 51GT; portanto, o tempo de atuação do relé comercial foi de 891,7 ms. O tempo de atuação do modelo de relé digital de sobrecorrente de terra é mostrado na Figura 10. Também são mostrados os sinais da magnitude, em valor eficaz, do fasor da corrente de seqüência zero (3I0), do ajuste da corrente mínima de operação (*Pickup* 51N), da operação do elemento de sobrecorrente de terra (51N) e de sua atuação (*TRIP* 51N); todos os valores de corrente estão referidos ao secundário. No momento em que a corrente de seqüência zero supera o ajuste da corrente mínima de operação, em aproximadamente 90,6 ms, ocorre a operação do elemento de sobrecorrente de terra. Decorridos 1,0059 s, a saída de *TRIP* do elemento de sobrecorrente é ativada; portanto, o tempo de atuação do modelo é igual a 915,3 ms. O erro percentual relativo entre os tempos de atuação do modelo e do relé comercial é igual a 2,65%. Bastante razoável, se considerarmos que a precisão da curva de tempo do relé comercial é  $\pm 4\%$  do tempo da curva normalizada, para uma corrente entre 2 e 30 múltiplos da corrente mínima de operação, ou  $\pm 1,50$  ciclo.

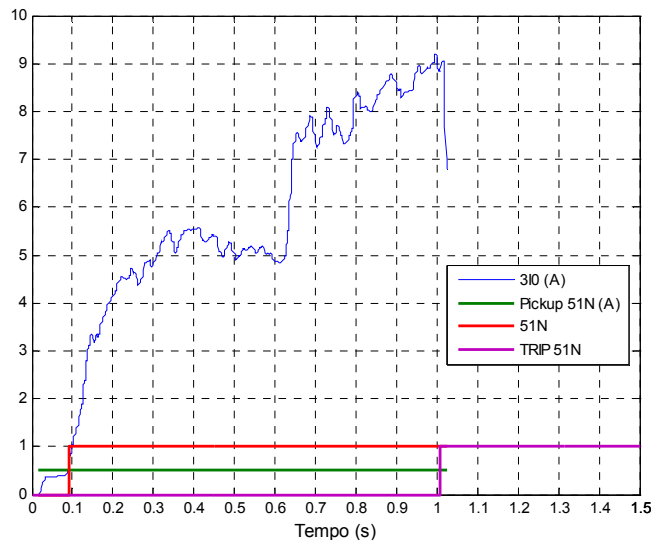


FIGURA 10 – Tempo de atuação do modelo de relé 51N

### 3.1.2 Relé Digital de Distância de Fase

A validação do modelo de relé digital de distância de fase foi realizada com o registro de uma falta bifásica, gerada com o programa ATP, aplicada em uma linha radial de transmissão de 69 kV, com extensão de 35 km. Neste caso, uma falta bifásica (fases A-B), sem resistência de falta, foi aplicada, em  $t = 100$  ms, a 5 km do ponto de instalação do relé; portanto, dentro do alcance da primeira zona (ajustada para 80% do comprimento da linha). Ambos os relés, digital de distância comercial e o modelo, foram parametrizados com os mesmos ajustes. Entretanto, a validação do modelo de relé de distância não é tão simples quanto a do modelo de relé de sobrecorrente, pois o relé comercial possui particularidades que nem sempre podem ser representadas em um modelo, devido à falta de informações fornecidas pelo fabricante. Na Figura 11, são mostrados os sinais de tensões e correntes aplicados no relé comercial.

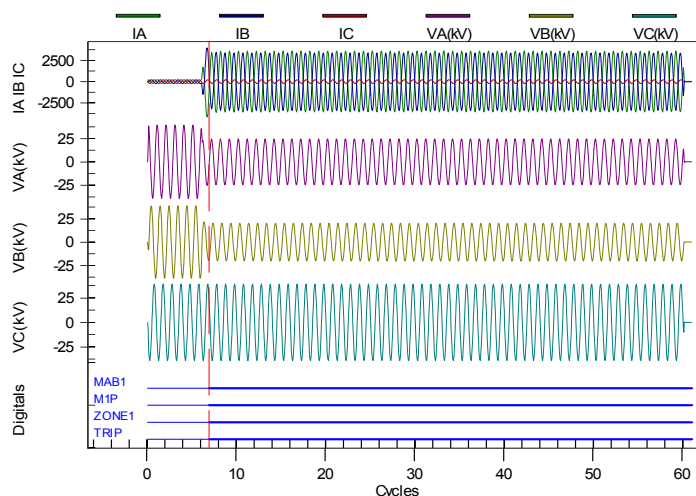


FIGURA 11 – Oscilograma de uma falta bifásica dentro do alcance da zona 1

Os elementos lógicos do relé comercial sinalizam o instante da operação do elemento MHO de distância de fase (*MAB1*), instantâneo, e da atuação da zona 1 (*M1P*). Observa-se que a zona 1 atuou em 116,7 ms (7 ciclos) a partir do instante de aplicação da falta (6 ciclos); portanto, seu tempo de atuação foi de 16,67 ms (1 ciclo).

O gráfico da Figura 12 mostra o exato momento em que a impedância da malha de falta A-B (*MAB*), estimada pelo algoritmo do modelo, cai abaixo do ajuste de impedância da zona 1 (*Ajuste Z1*), em aproximadamente 112,5 ms, após a aplicação da falta. Neste instante, a saída de *TRIP* da zona 1 (*TRIP Z1*) é ativada. Assim, o tempo de atuação da zona 1 do modelo foi de 12,5 ms, menos de 1 ciclo. Ainda da Figura 12, pode-se observar que as impedâncias de malha *MBC* e *MCA* estão situadas fora do alcance da zona 1; de fato, pois as fases B-C e C-A não participaram da falta. Conclui-se, portanto, que o erro percentual relativo entre os tempos de atuação do modelo e do relé comercial é igual a -33,4%; isto significa que o modelo foi mais rápido que o relé comercial em detectar e eliminar a falta, uma vez que o filtro de Fourier de um ciclo mostrou-se  $\frac{1}{4}$  de ciclo mais rápido que o filtro co-seno do relé comercial. No entanto, é preciso cautela para comparar os resultados, pois o tempo de atuação do relé comercial (1 ciclo) está dentro das especificações do fabricante.

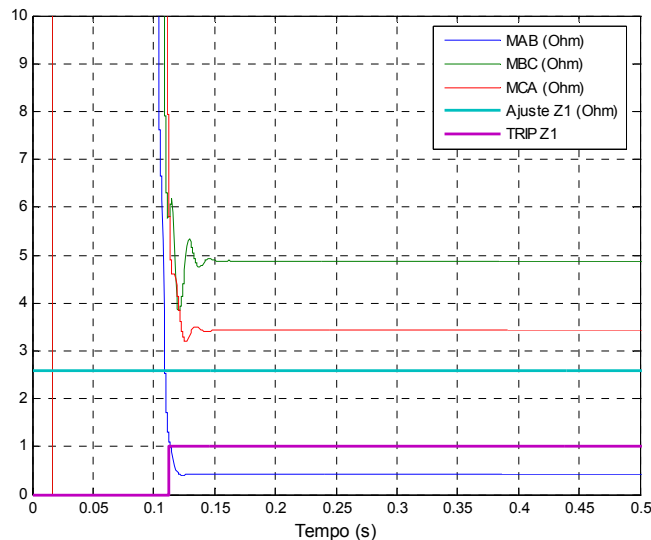


FIGURA 12 – Tempo de atuação do elemento MHO de zona 1

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A modelagem funcional dos relés digitais de proteção empregada neste trabalho mostrou-se precisa o suficiente para o desenvolvimento de pesquisas na área de proteção de sistemas de distribuição e subtransmissão, em que o objetivo é desenvolver novas lógicas ou mesmo novos algoritmos. A biblioteca de modelos de relés, ainda que simples na sua concepção, é bastante refinada quanto à funcionalidade e modularidade, pois permite uma composição entre os vários modelos para formar um sistema integrado de proteção e controle. A precisão dos modelos foi corroborada através da comparação do comportamento dos modelos implementados com o comportamento de relés comerciais, usando tanto registros de oscilografias coletadas em campo quanto registros de casos simulados com o ATP.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Salles, N. J., "Modelagem e Análise Dinâmica de Sistemas de Proteção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Síncronos", Tese de Mestrado – UNICAMP, 2007.
- (2) CIGRÉ Working Group B5.17, "Relay Software Models for Use with Electromagnetic Transient Analysis Programs", *CIGRÉ - Relatório Técnico*, 2006.
- (3) ATP – *Alternative Transients Program Rule Book*, Leuven EMTP Center, 1987.
- (4) Guzmán, A., Mooney, J., Benmouyal, G., Fischer, N., "Transmission Line Protection System for Increasing Power System Requirements", *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*, EUA, 2001.
- (5) CIGRÉ Working Group B5.17, "Relay Software Models for Use with Electromagnetic Transient Analysis Programs", *CIGRÉ - Relatório Técnico*, 2006.