

# Implementação de Rotinas em Programas de Curto-Circuito para Viabilizar Aplicações em Testes de Proteções de Linhas de Transmissão

Clarivaldo Almeida

COELBA / [calmeida@coelba.com.br](mailto:calmeida@coelba.com.br)

Sylvio Cayres

CP Engenharia / [scayres@aspeninc.com](mailto:scayres@aspeninc.com)

## 1. Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar um conjunto de ferramentas que podem ser vinculadas a programas de curto-circuito, sugerindo uma customização para permitir seu uso em testes de proteção de linhas de transmissão. A idéia é mostrar a evolução dos estudos necessários para a completa análise de faltas em linhas de transmissão aéreas ou cabos subterrâneos, com o enfoque iniciando-se na localização da falta. Este primeiro passo visa subsidiar as equipes de manutenção e as áreas de operação, desde a determinação geográfica do ponto de defeito até os estudos subsequentes para a análise da proteção em regime permanente. Simuladores de sistema de potência (caixas de teste com recursos de playback sincronizadas por GPS) poderão ser utilizados para testes ponta-a-ponta da linha, com os formatos de onda gerados a partir do programa de curto-circuito. Uma sugestão para uso das mesmas ferramentas como ponto de partida para estudos de transitórios em ATP ou PSCAD, por exemplo, se necessários, é também abordada. Simuladores digitais em tempo real, como o RTDS, são os mecanismos finais, cobertos pelo artigo, quando testes em malha fechada dos relés da linha forem imprescindíveis para identificação e solução do problema. Os procedimentos adotados requerem que o software de curto-circuito possibilite uma interface amigável com o usuário e possua recursos adicionais de programação, onde as rotinas sejam programas completamente desenvolvidos, com capacidade de tomada de decisão e lógicas computacionais próprias.

**Palavras-chave:** Curto-Circuito, Localização de Faltas, Proteção de LTs, Teste de Relés, Teste Ponta-a-Ponta de LTs, Impedância Medida, Exportação de Arquivos COMTRADE, Simulação em Tempo Real, Scripts para Programas de Curto-Circuito.

## 2. Introdução

Avanços significativos nas técnicas de solução e nas interfaces gráficas dos programas para cálculo de curto-circuito e coordenação da proteção resultaram, nos

últimos anos, em uma grande variedade de opções, cada vez mais rápidas e eficientes.

Os novos algoritmos de curto-circuito, que vêm sendo empregados desde meados dos anos 80, como os de Brandwajn & Tinney, Alvarado e outros, têm inúmeras vantagens, já bastante conhecidas dos engenheiros de sistemas de potência. Embora possam diferir em determinados passos da solução do curto-circuito propriamente dito, os métodos procuram resolver o problema de forma genérica, sendo capazes de simular praticamente qualquer tipo de falta. A força de alguns métodos vem de sua habilidade para resolver as tensões e correntes pós-falta em valores de fase ao invés de valores de seqüência. Em um passo intermediário, faz-se uma transformação dos equivalentes de seqüência para o domínio de grandezas de fase. A matriz de admitância de fase resultante é modificada para refletir as mudanças na topologia da rede. Métodos para manipular a matriz de admitância de fase para simular modificações desequilibradas são bem conhecidos por terem sido muito bem divulgados por Dr. Dommel e utilizados em seu EMTP. As soluções do sistema em grandezas de fase são convertidas de volta para o domínio de seqüência no final deste passo. Esta característica foi o principal avanço que livrou o programa de curto-circuito de quaisquer restrições nos tipos de faltas que podem ser simuladas. Faltas tipo série (como abertura de fases) e faltas simultâneas foram resultados imediatos. As diversas possibilidades, que então surgiram, de se implementar recursos adicionais aos programas de curto-circuito, fizeram dos novos métodos verdadeiros catalisadores de novas idéias. A integração entre curto-circuito e fluxo de potência passou a ser uma opção para viabilizar tensões pré-falta mais próximas da realidade. Os programas passaram a modelar não somente os componentes do circuito elétrico, como geradores, linhas de transmissão, transformadores e shunts, mas também os elementos de monitoração, controle e proteção desses componentes principais. A modelagem de disjuntores e relés de proteção tem evoluído muito. As ferramentas para ajuste de relés, coordenação da proteção e estudos

de superação de disjuntores representam hoje um enorme ganho em produtividade. Recursos adicionais são hoje possíveis através de rotinas que ficaram conhecidas como “macros”. Uma outra forma, mais robusta e eficaz de rotina, é chamada de “linguagem script”. Em sua versão mais aberta e versátil, o script pode ser desenvolvido numa linguagem de programação padrão de mercado e fácil de se usar, como o Basic, ou mesmo suas versões mais novas e com interface gráfica amigável, como as várias edições do Visual Basic. Trata-se, a rigor, de um sub-programa que pode ser rodado dentro do programa principal. O desempenho de um script poderá ser tão bom que, embora desenvolvido isoladamente, poderá ser, mais tarde, incorporado ao programa principal. A idéia de se usar os programas de curto-circuito para confirmar a localização de falta em linhas de transmissão, inicialmente feita por relés ou registradores digitais de perturbação, por simples comparação de resultados, é uma prática corriqueira. Com o surgimento de programas mais rápidos e com facilidades de se escrever scripts específicos para localização de falta e, ainda, com o aumento da velocidade de processamento, os programas de curto-circuito passaram a ser utilizados para subsidiar análise e localização de faltas “quase on-line”, quando da ocorrência de distúrbios. A localização de falta pode levar à conclusão de que a proteção da linha na qual o defeito ocorreu ou a de componentes adjacentes não atuou corretamente. Os recursos disponíveis de ajustes e coordenação da proteção podem ser inicialmente utilizados para se tentar encontrar o motivo da operação incorreta. Estando todos os ajustes corretos e não se encontrando, portanto, uma solução a partir do simples uso das ferramentas do programa de curto-circuito, pode-se optar pelos testes de bancada ou de campo dos relés envolvidos. Novamente pode-se recorrer a um script, agora para gerar arquivos em formato COMTRADE ou em formato DOBLE dos sinais senoidais resultantes da simulação da falta na linha. Os arquivos gerados pelo programa serão usados para testes dos relés individualmente em cada terminal da linha ou, ainda, em testes ponta-a-ponta, fazendo-se uso, em ambos os casos, de simuladores de sistemas de potência. Uma análise paralela em programas específicos para estudos elétricos de sistemas de potência em regime transitório pode ser realizada para subsidiar os testes dos relés. Aqui também o programa de curto-circuito é útil, fornecendo o circuito equivalente do sistema para viabilizar os estudos de transitórios. O mesmo circuito equivalente gerado pelo recurso do programa de curto-circuito poderá ser usado para testes em malha fechada dos relés de proteção, através de um simulador digital em tempo real.

### **3. Localização de Faltas**

#### **3.1. Objetivos**

A localização de faltas em linhas aéreas ou subterrâneas está entre os assuntos mais estudados em sistemas de potência. Devido à óbvia necessidade de se ter o local geográfico da falta determinado com precisão e rapidez, horas e horas de engenharia são gastas para se aprimorar, cada vez mais, as técnicas de localização. No caso de faltas permanentes, a localização é essencial para que se possa dar continuidade ao suprimento de energia sem alteração da configuração do sistema, com o mínimo de tempo de interrupção possível aos consumidores eventualmente afetados. Neste caso, uma equipe de manutenção deve ser imediatamente enviada à provável região do defeito para proceder ao reparo. Reduzir esta região a um pequeno trecho da linha ou a uma torre é o ideal para que os trabalhos de correção sejam rapidamente iniciados.

Também no caso de faltas temporárias, a localização é importante. Pode-se ter que fazer a limpeza da faixa de servidão, por exemplo, aparando-se árvores. O registro do local pode tornar evidente que um determinado trecho da linha ou uma torre estão com problemas de isolamento.

Em ambos os tipos de falta, sua localização é importante também para que se tenha uma análise da atuação da proteção da linha e do sistema, como um todo.

Hoje em dia, os aspectos relacionados à qualidade de energia tornam a questão ainda mais crítica. Daí surgem outras razões correlatas para uma localização eficiente. Localizar e manter um registro das faltas pode ajudar a determinar a necessidade de melhorias na blindagem numa certa seção de um cabo subterrâneo, por exemplo. Arquivando registros de faltas e, assim, mantendo uma extensa base de dados, o engenheiro de proteção responsável pela análise de ocorrências poderá ter meios de encontrar similaridades entre os defeitos ocorridos ao longo do tempo em uma mesma linha, por exemplo, ou em linhas protegidas pelo mesmo tipo ou modelo de relé. A análise da proteção é uma outra boa razão para se localizar faltas e manter um histórico dos registros. A confirmação de que os ajustes estão corretos ou precisam ser revistos surge, muitas vezes, após a análise de uma ocorrência no sistema ou de uma série de distúrbios com características semelhantes.

#### **3.2. Metodologias para localização de faltas**

Existem diversas ferramentas para cumprir a função de localizador de falta. Relés e registradores digitais de perturbação (RDPs) são hoje os instrumentos mais utilizados com esta finalidade, oferecendo o recurso como função adicional.

Entre as metodologias para localização de faltas em linhas de transmissão destacam-se as baseadas em

ondas trafegantes de tensão e corrente e as que se baseiam no cálculo da impedância vista do terminal da linha a partir das componentes na frequência fundamental de tensões e correntes neste terminal. Os algoritmos referentes à primeira metodologia têm se mostrado complexos e difíceis de serem implementados. Por outro lado, vários algoritmos e suas variantes vêm sendo sugeridos para a segunda metodologia. Basicamente dois métodos distintos podem ser enunciados. O primeiro utiliza as grandezas de tensão e corrente de um único terminal e o segundo faz uso das grandezas dos dois terminais.

### 3.3. Localização de falta através de simulações em programas de curto-circuito

Um dos métodos abordados neste artigo utiliza os dados de tensões e correntes obtidos de relés digitais ou RDPs, quando estes registram uma determinada falta em uma linha a partir de um de seus terminais (ou de ambos). Esses dados são comparados com os resultados de casos de faltas simulados ao longo da linha a passos pré-determinados (faltas intermediárias), de acordo com a precisão que se queira. Os valores encontrados nas simulações mais próximos dos valores reais obtidos de relés ou RDPs definem o percentual da linha no qual a falta ocorreu.

A distância encontrada pode ser comparada com a resposta apresentada pelos algoritmos de localização de falta de relés, RDPs e centrais de análise independentes. A prática tem mostrado que este método comparativo tem auxiliado muito as equipes de manutenção que patrulham a linha para determinar o ponto exato do defeito e proceder aos reparos necessários.

Para se implementar o script de localização de falta no programa de curto-circuito, deve-se poder passar instruções referentes aos tipos de conexões de faltas a serem simuladas seqüencialmente na linha e o passo (precisão) requerido e, então, obter dados do sistema e acessar os resultados da simulação de cada falta, ou seja, as saídas de tensão e corrente de fase das faltas intermediárias rodadas, passo a passo, para compará-las com os valores procurados. Comparações com as correntes e tensões de seqüência podem ser implementadas como opções adicionais. Para determinar-se a condição que melhor se aproxima daquela registrada pelos equipamentos da linha pode-se utilizar o método dos mínimos quadrados.

Deve-se ter condições de escolher o valor da resistência de falta. Esta pode ter a característica adicional de ser variável, permitindo que a verificação seja feita dentro de uma faixa plausível de valores. O passo percentual das faltas a serem aplicadas deve ser ajustável, de forma a se poder determinar a precisão mais adequada. É interessante que se possa modelar linhas com estruturas e até mesmo tipos de condutores diferentes. Deve-se poder utilizar pontos fictícios para separar as

diversas seções existentes e tais pontos não deverão ser considerados como barras durante o cálculo do curto-circuito ao longo da linha.

A Figura 1 apresenta uma caixa diálogo de um script com as informações típicas acima mencionadas. A Figura 2 mostra uma saída simples na tela, indicando, porém, um tipo de relatório para se obter mais detalhes sobre a simulação.

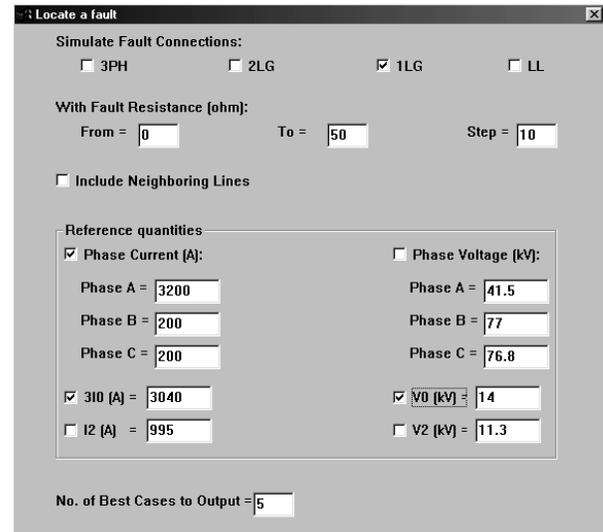


Figura 1: Caixa de diálogo para script de localização de falta em programa de curto-circuito

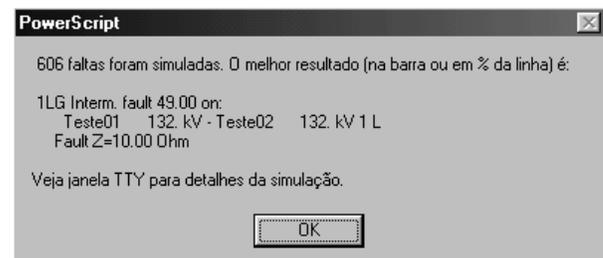


Figura 2: Caixa de saída com resultado da simulação de localização de falta

Um script para localização de faltas por simulação de curtos intermediários e acesso simultâneo às variáveis de ambos os terminais da linha, para comparação com os respectivos resultados dos equipamentos localizados nesses terminais, também poderá ser implementado.

### 3.4. Localização de falta em alimentadores ou linhas não homogêneas

Um caso especial é o das linhas ou alimentadores de distribuição com cabos de diferentes bitolas. Para que as equipes de manutenção possam fazer uso da função localização de falta, muitas vezes torna-se necessário elaborar tabela de correlação direta entre as distâncias

medidas pelos dispositivos de proteção e as distâncias reais correspondentes.

Um script especial pode ser desenvolvido, com o objetivo de fornecer as impedâncias aparentes vistas do terminal onde está situado o localizador de falta. Essas impedâncias servirão de base para o cálculo das distâncias medidas. Uma alternativa é dividir o alimentador em trechos, de acordo com as características do condutor, criando-se barras fictícias indicativas do início e fim de cada trecho. Uma tabela pode ser gerada pelo script, relacionando os passos das faltas intermediárias em cada trecho (os quais correspondem às distâncias geográficas) com as impedâncias aparentes medidas do terminal, seja através de um RDP, de um relé de distância ou de uma proteção com entrada de tensão e corrente e que possua a função de localização de falta. O script, portanto, calcula o equivalente às impedâncias medidas pelas unidades de fase e de terra de relés de distância para faltas sequenciais no trecho de linha, e ainda considera os trechos adjacentes. As saídas podem ser enviadas para arquivos com formatos CSV ou TXT. O objetivo principal é fornecer uma saída que possa ser lida por um programa padrão Microsoft, como o EXCEL e o Winword, para facilitar a customização de relatórios. A Figura 3 mostra uma caixa de diálogo específica para esta aplicação.

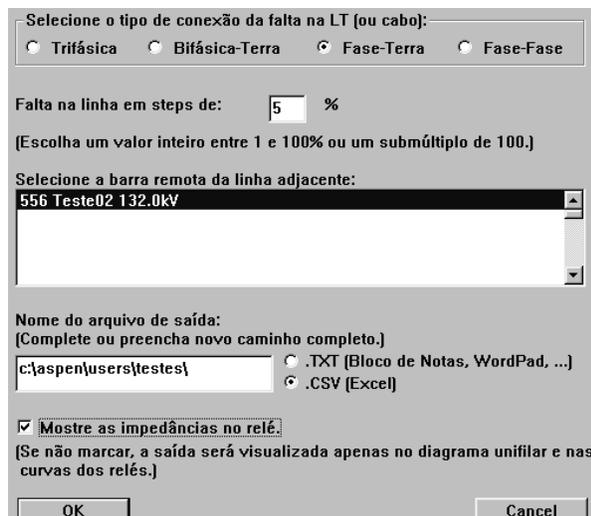


Figura 3: Caixa de diálogo para script de falta sequencial em linha com 2 trechos distintos

A codificação em Basic da parte de um script típico para a determinação da impedância medida pelas unidades de terra é apresentada a seguir. Variáveis internas do programa de curto-circuito e variáveis calculadas no script podem ser observadas neste exemplo.

```

...
' Cálculo de 3Kolo
K0I03mod(d) = 3*K0*Iseq0mod(d)
K0I03ang(d) = K0ang + Iseq0ang(d)
K0I03x(d) = K0I03mod(d)*Cos(K0I03ang(d)/(180/PI))
K0I03y(d) = K0I03mod(d)*Sin(K0I03ang(d)/(180/PI))

' Cálculo de Ia+3Kolo etc
lag(d) = Sqr((Ixa(d)+K0I03x(d))^2 + _
             (Iya(d)+K0I03y(d))^2)
If lag(d) = 0 Then lagang(d) = 0
If (Ixa(d)+K0I03x(d)) = 0 Then _
If (Iya(d)+K0I03y(d)) > 0 Then _
    lagang(d) = 90
If (Ixa(d)+K0I03x(d)) = 0 Then _
If (Iya(d)+K0I03y(d)) < 0 Then _
    lagang(d) = -90
If (Ixa(d)+K0I03x(d)) <> 0 Then _
    lagang(d) = (180/PI)*Atn((Iya(d)+K0I03y(d))/ _
                          (Ixa(d)+K0I03x(d)))
If (Ixa(d)+K0I03x(d)) < 0 Then lagang(d) = lagang(d) + 180

...
' Cálculo de Za=Va/(Ia + 3Kolo) etc
If lag(d) <> 0 Then Zag(d) = 1000*(Vfa(d)/lag(d))
If lag(d) = 0 Then Zag(d) = 999999
If Zag(d) < 0.000000001 Then Zag(d) = 0
Zagang(d) = Vfaang(d)-lagang(d)
If Zagang(d) < -180 Then If Zagang(d) > -540 Then _
    Zagang(d) = Zagang(d) + 360
If Zagang(d) > 180 Then If Zagang(d) < 360 Then _
    Zagang(d) = Zagang(d) - 360
If Zag(d) = 0 Then Zagang(d) = 0
If Abs(Zagang(d)) < 0.000001 Then Zagang(d) = 0
If Zag(d) > 1000000 Then Zag(d) = 999999

...

```

Exemplo de script em Basic para cálculo de impedância com variáveis do programa de curto-circuito

O exemplo abaixo é uma tabela customizada em EXCEL para correção dos valores indicados na localização de falta, tornando-os mais próximos aos valores reais de distância. No alimentador desse exemplo tem-se um caso real, com o primeiro trecho de 8 km em cabo 336,4 MCM e o segundo de 24,5 km em 4/0 AWG. A partir dos dados das características da linha e das impedâncias aparentes obtidas pelo script, a planilha cria automaticamente a correlação entre as colunas "LOC" (distâncias medidas) e "km real" (quilometragem real).

Se o relé for parametrizado com as constantes referentes ao primeiro trecho da linha, como é o caso desse exemplo, as divergências entre distância medida e real se acentuarão ao longo do segundo trecho. A tabela disponibiliza também um campo onde o usuário, à frente de um PC desktop ou laptop, pode obter a correlação para pontos intermediários ao segundo trecho, agilizando ainda mais o processo de busca do ponto de defeito pela equipe de manutenção. No exemplo, para uma indicação do relé em 30 km, a distância mais aproximada da falta seria 26,19 km,

cerca de 3,8 km a menos, o que já é uma diferença significativa para a equipe que está percorrendo a linha.

RELAÇÕES ENTRE LOCALIZAÇÃO DE FALTA E DISTANCIA REAL PARA FALTAS ENTRE FASES									
Trecho	Cabo	l, %	km l	km real	LOC	IMPEDANCIAS OBTIDAS PELO SCRIPT			
						Modulo	Angulo		
Trecho 1	336,4MCM	10	0,80	0,80	0,80	0,3477	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	20	1,60	1,60	1,60	0,6953	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	30	2,40	2,40	2,40	1,0430	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	40	3,20	3,20	3,20	1,3907	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	50	4,00	4,00	4,00	1,7384	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	60	4,80	4,80	4,80	2,0860	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	70	5,60	5,60	5,60	2,4337	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	80	6,40	6,40	6,40	2,7814	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	90	7,20	7,20	7,20	3,1291	64,06		
Trecho 1	336,4MCM	100	8,00	8,00	8,00	3,4768	64,06		
Referencia 1: Mudança de condutores									
Trecho 2	#4/0 CAA	10	2,45	10,45	10,96	4,9221	60,52	Valores intermediários	
Trecho 2	#4/0 CAA	20	4,90	12,90	13,83	6,3776	58,59		
Trecho 2	#4/0 CAA	30	7,35	15,35	16,89	7,8378	57,38		
Trecho 2	#4/0 CAA	40	9,80	17,80	19,86	9,3003	56,55		
Trecho 2	#4/0 CAA	50	12,25	20,25	22,82	10,7643	55,95		
Trecho 2	#4/0 CAA	60	14,70	22,70	25,78	12,2292	55,49		24,50
Trecho 2	#4/0 CAA	70	17,15	25,15	28,75	13,6947	55,12		29,64
Trecho 2	#4/0 CAA	80	19,60	27,60	31,71	15,1607	54,83		0,825596
Trecho 2	#4/0 CAA	90	22,05	30,05	34,68	16,6270	54,59		22,00
Trecho 2	#4/0 CAA	100	24,50	32,50	37,64	18,0936	54,39		

Exemplo de planilha EXCEL para a tabela de correção dos valores de localização de falta a partir do script para cálculo de impedâncias

Considerando-se que uma concessionária de distribuição possa ter em seu sistema inúmeros casos de linhas ou alimentadores não homogêneos, nos quais a aplicação da função localização de falta requer um prévio estudo de viabilidade, a utilização de processos automatizados assume grande importância frente a um reduzido quadro técnico e aos requisitos de qualidade exigidos do Setor Elétrico.

### 3.5. Localização de falta em linhas com configurações mais complexas

Um outro caso especial é o das linhas de transmissão de extra alta tensão série-compensadas, cujos capacitores são protegidos por MOV (Metal Oxide Varistor). O programa de curto-circuito deve permitir que sejam implementados scripts até mesmo relativamente complexos, como a solução iterativa de faltas levando-se em conta a característica não-linear dos MOVs nessas linhas, utilizando-se, por exemplo, o conhecido algoritmo proposto por Daniel Goldsworthy. Em um artigo que Goldsworthy publicou em 1987, e que até hoje é a principal referência sobre o assunto, é proposto um modelo linearizado para o conjunto capacitor-série e MOV, através de fórmulas empíricas para a impedância equivalente do conjunto em função da corrente do capacitor. A relação entre o script e o programa principal pode ser otimizada ao longo do tempo, e de acordo com os vários testes realizados e confirmados na prática, a ponto da rotina, criada em Basic, poder ser embutida dentro do programa principal, na sua linguagem original, como o C++, por exemplo. Assim, a localização de faltas pelo método de simulação, acima descrito, poderá ser utilizada também

em uma linha série-compensada. De acordo com o valor da corrente no capacitor, resultante de cada falta sequencial inicialmente aplicada – caso este valor exceda o limite da corrente de proteção do capacitor definida pelo fabricante –, o algoritmo calculará os valores variáveis de Rc e Xc que serão usados na iteração seguinte, que resultará no novo valor de corrente, o qual será usado para calcular os novos valores de Rc e Xc, e assim sucessivamente, até que se dê a convergência pré-definida. O exemplo a seguir mostra uma parte de uma codificação em Basic para o cálculo de Rc e Xc, conforme sugerido por Goldsworthy.

```

...
If GetSCCurrent(CapHandle, MagI, AngI, 4) > 0 Then _
    I1 = MagI(1)
If GetData(CapHandle, SC_dlpr, lpr) = 0 Then GoTo HasError
lpr = lpr * 1000
If ( I1 > lpr ) Then
    If ( I1 > 10*lpr ) Then I1 = 10*lpr
lpu = I1 / lpr
Rc = Xo(SCapsN)*(0.0745 + 0.49*Exp(-0.243*lpu) - _
    35.0*Exp(-5.0*lpu) - 0.6*Exp(-1.41*lpu))
Xc = Xo(SCapsN)*(0.101 - 0.005749*lpu + _
    2.088*Exp(-0.8566*lpu))
Else
Xc = Xcap
Rc = Rcap
X0c = X0cap
R0c = R0cap
End If
Else
Xc = Xcap
Rc = Rcap
X0c = X0cap
R0c = R0cap
End If
If SetData(CapHandle, SC_dX, Xc + 0.2*(Xcap-Xc)) = 0 _
    Then GoTo HasError
If SetData(CapHandle, SC_dX0, Xc + 0.2*(X0cap-Xc)) = 0 _
    Then GoTo HasError
If SetData(CapHandle, SC_dR, Rc + 0.2*(Rcap-Rc)) = 0 _
    Then GoTo HasError
If SetData(CapHandle, SC_dR0, Rc + 0.2*(R0cap-Rc)) = 0 _
    Then GoTo HasError
If PostData(CapHandle) = 0 Then GoTo HasError
End If
...

```

Exemplo de script em Basic para cálculo da impedância do conjunto capacitor-série/MOV com variáveis do programa de curto-circuito

### 4. Testes da Proteção

A seguir, alguns testes da proteção são sugeridos. Uma série de outros poderiam ser realizados com o auxílio do programa de curto-circuito e de rotinas especialmente desenvolvidas para esta finalidade. Programas que modelam os relés e permitem a monitoração da coordenação da proteção dão campo a uma infinidade de idéias nesta área.

#### 4.1. Testes em malha aberta local

Uma vez detectada a necessidade de se testar a proteção da linha afetada diretamente pela falta ou dos circuitos adjacentes, pode-se implementar um script para registrar os dados das diversas simulações e exportá-los em mídia removível, como disquetes, de forma que possam ser utilizados em bancada ou junto aos painéis de proteção para teste dos relés, em regime permanente e frequência fundamental, através de simuladores de sistema de potência, também conhecidos como caixas de teste. Esse teste é denominado teste de malha aberta e está ilustrado, de forma simplificada, na Figura 4. Esses equipamentos de teste devem possuir recursos de playback que permitam injetar os sinais gravados nos terminais dos relés, diretamente ou através de amplificadores de tensão e de corrente. Os arquivos são gravados pelo script em formato COMTRADE ou em formatos proprietários dos fabricantes dos equipamentos. Entre os formatos mais tradicionalmente difundidos está o da DOBLE.

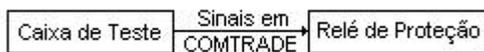


Figura 4: Teste de malha aberta da proteção

Portanto, a exportação pode ser feita no formato DOBLE (\*.ssl e \*.txt) e no formato COMTRADE (\*.dat, \*.cfg e \*.hdr), podendo também ser feita em formatos para uso em aplicações específicas do usuário, como os delimitados por "tab", para leitura por processadores de textos, e os delimitados por vírgula (\*.csv), para leitura no Microsoft EXCEL com os dados devidamente ajustados por colunas.

O script deverá acessar todos os resultados de interesse das simulações e disponibilizá-los para uso imediato, sem necessidade de conversões adicionais. Para tanto, deverá coletar também, dos dados dos relés inseridos no programa de curto-circuito, os valores de relação de TP e de TC. Assim, serão gravadas, já em grandezas secundárias, as tensões e correntes trifásicas e as tensões e correntes de seqüência. Valores pré-falta e pós-falta também deverão ser armazenados nos formatos DOBLE e COMTRADE.

Caberá ao usuário definir mais detalhes de sua proteção como, por exemplo, uma opção para religamento, informando o tempo morto a ser considerado, e ainda a opção de desligamento tripolar ou monopolar. Todos os tempos envolvidos poderão ser estabelecidos pelo usuário ou até mesmo tirados dos dados de atuação da proteção.

#### 4.2. Testes em malha aberta ponta-a-ponta

Se o teste de bancada, ou o teste local da proteção, não for suficiente, devendo-se proceder a testes da proteção local e remota simultaneamente, este script deverá gerar os arquivos das simulações nos dois terminais da linha. Os testes ponta-a-ponta da proteção da linha em regime permanente serão feitos com simuladores de sistema de potência sincronizados por GPS, conforme mostrado na Figura 5.

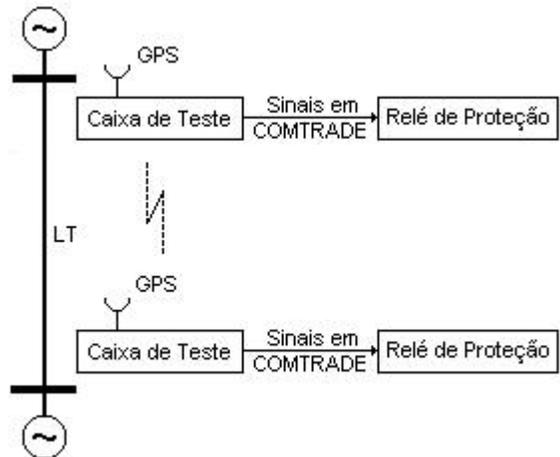


Figura 5: Teste de ponta-a-ponta da linha (malha aberta)

A Figura 6 mostra detalhes de uma caixa de diálogo que seleciona as simulações que serão exportadas, os formatos nos quais os arquivos correspondentes serão exportados, as grandezas que serão registradas e os valores de RTP e RTC dos dois terminais da linha. A Figura 7 mostra os detalhes de uma exportação em COMTRADE e a Figura 8 apresenta, de forma gráfica, o resultado desta exportação.

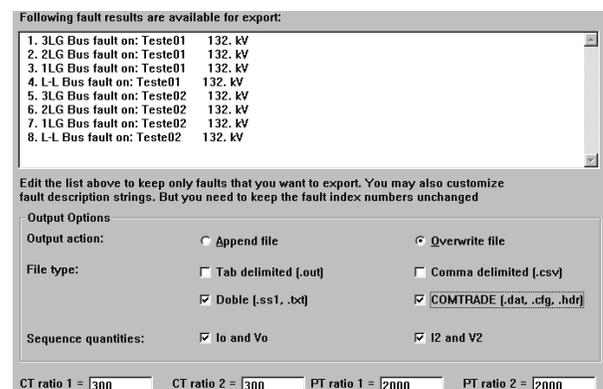


Figura 6: Caixa de diálogo para exportação de arquivos de simulações para teste de relés

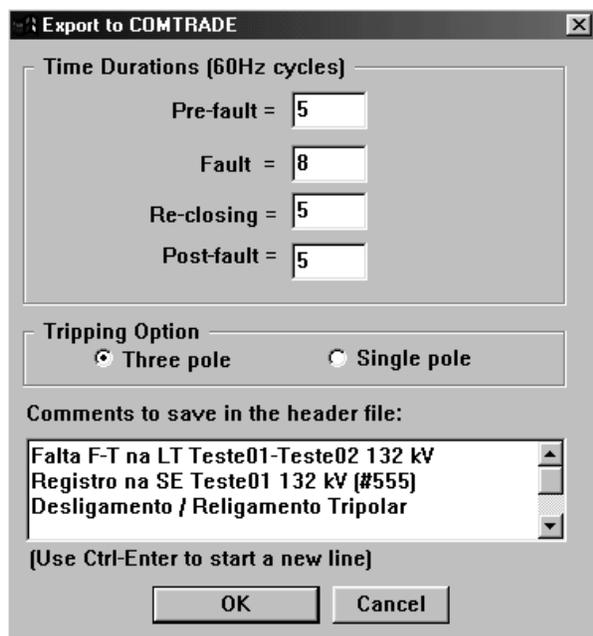


Figura 7: Caixa de diálogo para exportação de arquivo de falta em formato padrão IEEE/COMTRADE

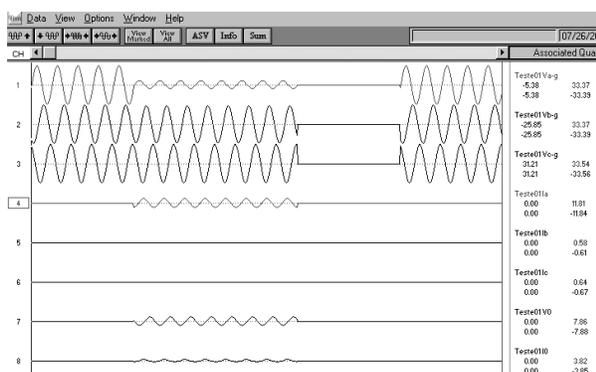


Figura 8: Resultado da exportação descrita na caixa de diálogo anterior

#### 4.3. Estudos em programas de transitórios

Paralelamente aos testes em regime permanente, acima mencionados, pode-se fazer um estudo de transitórios em programas como o EMTTP, o ATP, o EMTDC, o PSCAD e outros. Esses programas não comportam um número muito grande de barras devido à complexidade da modelagem de cada componente do sistema. Aqui, o programa de curto-circuito é geralmente utilizado para gerar o sistema equivalente. As linhas e demais componentes de interesse para o estudo de transitórios poderão ser, então, detalhados no programa específico. O equivalente é normalmente obtido através da definição de barras de fronteira e linhas de interligação, de forma a se delinear a região que deverá ser retida.

Um script também pode ser desenvolvido para automatizar este procedimento.

Se a partir do equivalente, os estudos forem feitos em PSCAD, há ainda a opção de se gerar formatos de onda transitórios usando arquivos COMTRADE ou arquivos RTP (Real Time Playback). Então, testes locais ou ponta-a-ponta da proteção da linha poderão ser realizados, agora para regime transitório, da mesma forma como anteriormente descritos para regime permanente.

#### 4.4. Testes em malha fechada

Se, finalmente, optar-se pelos testes que vêm sendo consagrados no Setor Elétrico como definitivos para um estudo completo da proteção, deve-se recorrer ao teste em malha fechada com o uso de simuladores digitais em tempo real, conforme simplificado e ilustrado na Figura 9.



Figura 9: Teste em malha fechada da proteção

Da mesma forma que nos estudos com programas de transitórios, há necessidade de se ter um sistema equivalente para ser modelado no RTDS, que detalhará os componentes de interesse do sistema.

#### 5. Requisitos para Implementação de Rotinas

É essencial que o programa de curto-circuito e coordenação da proteção possua uma perfeita interação com ferramentas externas customizáveis pelo engenheiro de proteção, possibilitando o acesso a dados do sistema e variáveis de falta, permitindo, assim, que se passe instruções ao programa e que se manipule aplicativos externos. Para que uma interação tão ampla possa ocorrer em plataformas padrão de mercado, como o Sistema Operacional / Ambiente Gráfico Windows, o programa de curto-circuito deverá suportar padrões de automação, como o OLE (Object Linking and Embedding). A interação poderá ser implementada através de rotinas com estruturas próprias, em linguagem também padrão de mercado, que deverão funcionar como sub-programas para o programa de curto-circuito (programa principal). Esses sub-programas ou scripts deverão permitir a implementação de uma lógica computacional autônoma, sendo um instrumento de interface entre usuário e programa principal.

O padrão de automação OLE é uma tecnologia que permite que o programador de aplicações baseadas em Windows crie um programa externo, em linguagem Basic, por exemplo, que possa disponibilizar dados (objetos) de muitas aplicações diferentes, permitindo que o usuário possa editar esses dados para utilizá-los internamente ao programa ou transferi-los para outro programa. Isto permite o desenvolvimento de ferramentas simples e/ou programas complexos que podem interagir com outros programas.

As metodologias apresentadas neste artigo para a implementação dos scripts, requerem a utilização de funções para obter as variáveis de interesse de dentro do programa de curto-circuito. Essas variáveis podem ser armazenadas e manipuladas pelos scripts, de forma a serem convenientemente usadas para efetuar cálculos e comparações. Uma forma de permitir que os scripts sejam rodados como sub-programas do programa principal é o uso de um identificador para cada objeto da rede. Assim, quando se fornece o identificador do objeto como entrada para uma função do script, a função reconhecerá a que objeto se está fazendo referência. Na confecção do script, como na de qualquer programa, deve-se utilizar sub-rotinas e funções para torná-lo modular.

A interface com o usuário deve ser gráfica e amigável. Os comandos para obter dados do sistema elétrico modelado e resultados das simulações do programa de curto-circuito devem utilizar caixas de diálogo intuitivas. As saídas devem permitir intercâmbio com os aplicativos padrão de mercado.

## 6. Conclusões

O artigo propõe o uso de rotinas (scripts), na forma de sub-programas com estruturas próprias e linguagem robusta, em conjunto com software de curto-circuito, como mecanismo de análise da proteção de linhas de transmissão, partindo da localização de falta na linha e evoluindo para testes dos relés e estudos mais detalhados, se necessários.

Seguindo-se o curso natural da análise de uma falta na linha de transmissão, scripts completos podem ser desenvolvidos para:

- i) localização de falta por simulação de curto-circuito seqüencial na linha e comparação de resultados obtidos por relés ou RDPs (ou alternativamente por comparação das impedâncias medidas de um dos terminais da linha);
- ii) exportação de simulações de falta em formato COMTRADE ou DOBLE, entre outros, para testes em malha aberta local ou ponta-a-ponta da proteção da linha;
- iii) elaboração de equivalente do sistema para estudos paralelos em programas de transitórios e/ou testes em malha fechada da proteção da linha em RTDS.

Outras implementações podem ser feitas através de scripts, como a simulação de faltas com acesso aos resultados do programa de curto-circuito de ambos os terminais da linha.

Configurações mais complexas, como as de linhas com compensação série, também podem ser modeladas nos scripts, o que comprova sua robustez e eficiência.

Já estão disponíveis no mercado os meios para tornar os programas de curto-circuito ferramentas eficazes para criação de objetos incorporados e vinculados, bem como as linguagens de programação para permitir o desenvolvimento de algoritmos para acesso ao banco de dados do sistema elétrico e às variáveis internas aos programas, para a subseqüente manipulação desses valores e obtenção de soluções para questões específicas.

## 7. Referências

1. Brandwajn, V.; Tinney, W.F.; "Generalized Method of Fault Analysis" – IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, Nº 6, Jun. 1985.
2. Chan, Sherman M.; "Recent Advances in Short Circuit Computations" – Western Protective Relay Conference, 1987.
3. Goldsworthy, Daniel L.; "A Linearized Model for MOV-Protected Series Capacitors" – IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, Nº 4, Nov. 1987.
4. Lee, Gerald E.; Goldsworthy, Daniel L.; "BPA's Pacific AC Intertie Series Capacitors: Experience, Equipment & Protection" – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, Nº 1, Jan. 1996.
5. Raveling, Don; "User Experience with ASPEN OneLiner Short Circuit and Relay Coordination Program" – Minnesota Power Systems Conference, 1991.
6. Lin, Ding; Wachal, Randy; "Preparation of Transient Simulation Data for PSCAD Relay" – Case Study of Manitoba Hydro, May 2003.
7. Nguyen, Thanh C.; Chan, Sherman M.; Bailey, Ron; Nguyen, Thanh; "Auto-Check Circuit Breaker Interrupting Capabilities" – IEEE Computer Applications in Power, Vol. 14, Nº 1, Jan. 2002.
8. ASPEN OneLiner Short Circuit and Relay Coordination Program User Manual.
9. ASPEN PowerScript Reference Manual.
10. Cypress Enable Scripting Language Reference Manual.
11. Cypress Enable Scripting Language Elements Manual.
12. Microsoft Visual Basic for Applications (VBA) Reference Manual.