

Capítulo 1

Introdução Geral

Em uma realidade baseada num mercado de energia elétrica competitivo, a ocorrência de uma situação inesperada e até mesmo inevitável em um sistema de transmissão, pode causar a interrupção no fornecimento de energia, resultando em prejuízos tanto financeiros quanto materiais, junto às concessionárias de energia e a seus consumidores.

Num setor onde o produto é a energia elétrica, os aspectos relacionados à proteção de sistemas elétricos de potência, ganham um destaque especial e tem sido investigados há muitos anos, visando melhor resguardar a estabilidade e os equipamentos envolvidos na transmissão de energia, frente a estas ocorrências aleatórias e imprevisíveis, que na maioria das vezes são conhecidas como faltas.

Por conta disso, minimizar as interrupções e encaminhar o rápido restabelecimento no fornecimento de energia dependerá inicialmente da localização do ponto de falta e da realização de reparos necessários, pois somente desta forma, será possível assegurar e melhorar os aspectos relativos à qualidade no fornecimento da energia elétrica, pelas concessionárias aos seus consumidores.

Assim, para atender a este novo cenário de competitividade e a consumidores cada vez mais exigentes, o setor elétrico brasileiro tem sofrido um considerável processo de reestruturação, que tem na ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica [1], um órgão responsável pela regulamentação e fiscalização de indicadores de qualidade em nosso país.

Dentro deste contexto, este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo da proteção de sistemas elétricos de potência, cujo enfoque principal é a localização de faltas em sistemas de transmissão, que vem sendo objeto de estudos por parte de engenheiros e pesquisadores em sistemas de energia, visto que no cotidiano desses sistemas existe um

amplo espectro de distúrbios eletromagnéticos, dos quais os curtos-circuitos, são as principais causas destes fenômenos, juntamente com as descargas atmosféricas, as manobras de equipamentos e de linhas de transmissão.

Desta forma, tanto a localização de faltas, como a análise dos eventos associados a estas faltas, podem representar um instrumento importante para a avaliação do desempenho de um sistema elétrico, segundo a confiabilidade de seus esquemas de proteção e a qualidade de energia fornecida aos seus consumidores.

Inicialmente, o trabalho trata da conceituação e dos aspectos fundamentais do tema qualidade de energia, no sentido de fornecer elementos necessários ao diagnóstico de perturbações, tais como curtos-circuitos em linhas de transmissão. Feita esta abordagem inicial, direcionamos nossa proposta para o estudo e o desenvolvimento de uma nova ferramenta computacional voltada à localização de faltas em sistemas de transmissão, segundo uma metodologia baseada na teoria de ondas viajantes e na estimação de sinais transitórios associados à faltas, e que foi avaliada num sistema britânico e num sistema brasileiro.

1.1. O Estudo da Qualidade de Energia:

O fornecimento de energia elétrica de forma confiável, com a tensão de suprimento segundo limites normalizados, é o que idealmente se espera dos sistemas de concessionárias de energia. Entretanto, o fornecimento contínuo e isento de perturbações ou distúrbios não constitui uma tarefa realista. Uma boa qualidade no fornecimento, não significa uma energia perfeita, visto que a própria utilização normal de energia gera perturbações e problemas no próprio sistema de energia, cuja natureza, severidade e frequência de eventos podem variar de um local para outro no sistema, afetando assim sua estabilidade e confiabilidade. Estes dois aspectos primordiais a um sistema de energia, aliados à nova política de regulamentação no setor de energia elétrica, citada anteriormente, vem encaminhando e motivando novas pesquisas voltadas ao estudo da qualidade de energia.

Com o objetivo de eliminar ou reduzir os efeitos e problemas causados por estas perturbações, deve-se inicialmente ter o conhecimento do sistema em questão, os tipos de cargas que compõem o mesmo e assim buscar identificar a fonte de distúrbios [2]. Para

isso, diversas ferramentas podem ser empregadas, como as do monitoramento, simulações, ensaios em laboratórios e testes de campo.

Entre as perturbações mais comuns estão os afundamentos e elevações de tensão (*sags* e *swells*), interrupções, impulsos, desequilíbrios, distorções harmônicas, flutuação de tensão, recortes na tensão e ruídos, tratados em diferentes publicações técnicas, mas onde destacamos [3], [4] e [5].

Observa-se portanto, que o tema Qualidade de Energia Elétrica, doravante denominado QEE, é também de considerável importância para o setor elétrico, uma vez que no conjunto da análise de transitórios associados à faltas em sistemas de transmissão e também na localização das mesmas, refletirá no melhor entendimento e identificação das perturbações, como também no tempo utilizado pelas equipes de manutenção e o pronto restabelecimento do sistema, buscando garantir a estabilidade, a confiabilidade e consequentemente uma melhor qualidade de energia.

Na seção seguinte, faz-se considerações gerais a respeito das técnicas de localização de faltas, dentre elas, as que utilizam algoritmos segundo a teoria de ondas viajantes em sistemas de transmissão [6], a qual foi aplicada no desenvolvimento de nossa proposta.

1.2. A Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão:

O aumento da complexidade de sistemas de transmissão, tornou de grande importância as técnicas de localização de faltas, as quais são consideradas como um dos mais interessantes tópicos de pesquisa nos últimos anos. Isto, devido aos grandes benefícios obtidos com a detecção da posição da falta, o que consequentemente reduz os tempos das ações para o restabelecimento do sistema, citados anteriormente.

As técnicas de localização de faltas, podem ser classificadas entre aquelas que requerem medições em ambos terminais da linha e aquelas que requerem medições em apenas um terminal. Sabe-se muito bem, que as técnicas utilizando dados de ambos os terminais necessitam *links* de comunicação e requerem equipamentos de amostragem sincronizados. Desde que, os localizadores de falta de um único terminal não requerem informações de outros pontos do sistema, eles tem sido uma opção atrativa para pesquisas em sistemas de potência, sendo portanto o que foi adotado em nosso trabalho.

Muitos algoritmos de localização de faltas a partir de um único terminal tem sido propostos, alguns dos quais são baseados no cálculo da frequência fundamental dos sinais de corrente e tensão, chamados de *Algoritmos baseados na Impedância*, utilizando um modelo simples de linha de transmissão, levando em conta apenas, que a impedância da linha é linear a distância e ignorando a capacitância shunt distribuída [7] e [8]. Outros algoritmos, esses baseados em modelos de linha distribuídos, utilizam a teoria de ondas viajantes, são os chamados *Algoritmos baseados em Ondas Viajantes*, cujo conhecimento da impedância de surto da linha e a diferença entre o tempo de chegada do primeiro pulso de onda, devido a uma falta em cada terminal da linha, podem auxiliar na localização da falta [9], [10] e [11].

É importante ressaltar, que o fato do rápido desenvolvimento da tecnologia de microprocessadores e das capacidades de processamento de sinais em tempo real, vem permitindo a implementação de metodologias de proteção e localização de faltas, as quais eram consideradas ser impraticáveis anteriormente. Assim, muitas pesquisas tem sido conduzidas para desenvolver novos princípios e técnicas de releamento no sentido de fornecer altos níveis de *performance*, e desta forma, não somente esquemas de proteção baseados em ondas viajantes, mas como proteção de distância adaptativa [12], da análise multi-resolução via a transformada *wavelet* [13], de aplicações de redes neurais [14], e de sinais transitórios [15] tem sido desenvolvidos com o avanço da tecnologia digital.

Em seguida, é apresentada a proposta deste trabalho, justificada em função dos tópicos *Qualidade de Energia* e *Localização de Faltas* descritos sucintamente até o momento, mas que serão destacados posteriormente neste documento.

1.3. A Proposta do Trabalho:

Definidos os tópicos elencados anteriormente, iniciou-se os estudos e avaliações para a definição e elaboração de nossa proposta de tese, com base no método apresentado por David W. P. Thomas em [16] e [17], que utiliza as propriedades de ondas viajantes, permitindo estimar transitórios associados à faltas em sistemas de energia e proporcionando uma melhoria na localização destas.

Desta forma, nossa proposta foi a de desenvolver uma ferramenta capaz de realizar a análise comparativa de transitórios e a localização de faltas em sistemas de transmissão, aliando simulações do *software* de transitórios eletromagnéticos EMTP/ATP (*Eletromagnetic Transients Program/Alternative Transients Program*) [18], [19], [20] e

[21], desenvolvido por Herman W. Dommel, com um programa em ambiente MatlabTM [22], onde uma interface gráfica reproduz os transitórios simulados, permitindo a análise através da comparação direta com os registros de campo, além de rotinas tais como a de análise modal, a de estimação de tensões transitórias e a de estimação na localização de faltas.

Com os resultados obtidos, através de simulações e análises feitas na modelagem do sistema britânico de 400 kV da *Scottish Power*, durante o estágio de doutoramento na Inglaterra, com o Dr. David Thomas, e também na modelagem do sistema brasileiro de 525 kV da Eletrosul, durante a última etapa deste trabalho, entendemos que as diferentes perturbações que afetam estes sistemas de transmissão, principalmente aquelas devidas às faltas, poderão ser melhor compreendidas, proporcionando condições e ou soluções, buscando garantir a qualidade de energia elétrica e a confiabilidade dos dispositivos de proteção associados a estes sistemas.

1.4. Contribuição do Trabalho:

Entre as principais contribuições deste trabalho, podemos destacar o desenvolvimento de uma nova ferramenta computacional, para a análise e identificação de transitórios de alta frequência, provenientes de faltas em sistemas de transmissão de Extra Alta Tensão-EAT. Tanto a teoria de ondas viajantes [6], como também a metodologia de estimação de tensões transitórias [16] e [17], favoreceram a implementação desse programa, permitindo identificar e localizar as faltas nestes sistemas, de maneira muito prática.

Entendemos também, que diante de investimentos e da reestruturação do setor elétrico brasileiro, nossa contribuição poderá atender as necessidades de localização de faltas em esquemas, que atualmente são voltados somente à proteção de sistemas de transmissão.

Essas observações serão ilustradas neste documento, através de estudos realizados no sistema britânico e no sistema brasileiro, visando principalmente demonstrar a validade e a aplicabilidade das teorias empregadas e do programa desenvolvido.

1.5. Estruturação do Documento:

Apresenta-se a seguir, como esse documento de tese foi estruturado:

O Capítulo 2 apresenta as definições, os aspectos fundamentais e os principais distúrbios associados à Qualidade de Energia Elétrica, bem como sua relação com o conceito de Compatibilidade Eletromagnética e encerrando com considerações a respeito da monitoração, a mitigação dos problemas em QEE, normas e limites.

O Capítulo 3 é voltado à localização de faltas, onde é apresentada a teoria de ondas viajantes, como também um relato da aplicação desta teoria em esquemas de proteção, concluindo com a apresentação do método para estimação de transitórios associados a faltas, e que constituíram a base teórica para o desenvolvimento da ferramenta proposta neste trabalho.

O Capítulo 4 apresenta a estrutura do *software* EMTP/ATP aplicado à análise de transitórios eletromagnéticos, considerações a respeito das principais faixas de frequências associadas a fenômenos transitórios, concluindo com a modelagem no ATPDraw [21] dos sistemas de transmissão utilizados nesse trabalho.

O Capítulo 5 apresenta a ferramenta computacional *FLATP- Fault Locator Using The ATP*, desenvolvida para a análise de transitórios de ondas viajantes, com suas diferentes rotinas, dentre elas, a principal que trata da localização de faltas em sistemas de transmissão.

O Capítulo 6 apresenta os resultados com a utilização do programa FLATP, através do processamento de arquivos obtidos a partir de simulações no EMTP/ATP, comparações com resultados de registros em subestações, e resultados referentes à localização de faltas em ambos sistemas utilizados.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e considerações finais, bem como a proposição de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Qualidade de Energia Elétrica

A Qualidade de Energia Elétrica fornecida sempre foi objeto de preocupação de concessionárias de energia, responsáveis pelo fornecimento, bem como do setor industrial, principal consumidor. Mas este assunto assumiu considerável importância nos últimos anos em face de prejuízos decorrentes do crescimento do número de interrupções de processos industriais, que utilizam equipamentos sensíveis a uma ampla variedade de distúrbios eletromagnéticos que ocorrem em sistemas de energia, decorrentes principalmente de contingências na própria operação destes, como também de fenômenos naturais.

Estes problemas, que praticamente não existiam no passado, uma vez que as cargas eram essencialmente eletromecânicas, logo, menos sensíveis ocorrem devido ao desenvolvimento e à utilização cada vez mais crescente de equipamentos e de controles eletrônicos, portanto exigindo cuidados para uma convivência mais harmoniosa em um ambiente eletromagnético, de forma a garantir a compatibilidade e a qualidade de energia elétrica.

2.1. Definição de Qualidade de Energia Elétrica:

O termo Qualidade de Energia Elétrica – QEE é empregado para englobar uma grande variedade de distúrbios eletromagnéticos que ocorrem em sistemas de energia elétrica.

Do ponto de vista das formulações técnica e matemática, a energia elétrica é definida como a integral, no tempo, do produto da tensão pela corrente de carga. Já a

definição consensual da ‘qualidade’ desta grandeza, se mostra algo realmente difícil e com significados distintos diante de especialistas do setor de energia, como exemplo, na Europa o termo QEE é associado à qualidade da tensão (*Voltage Quality*), nos EUA à qualidade da potência (*Power Quality*) e na África do Sul à qualidade de suprimento (*Quality of Supply*).

Assim, na ausência de uma definição de consenso, o monitoramento da qualidade de energia tem sido determinado fundamentalmente pela *performance* dos equipamentos do consumidor final. Dentro deste enfoque, a Qualidade de Energia Elétrica tem sido conceituada da seguinte forma em nosso país [23]:

“Energia elétrica de boa qualidade, é aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas.”

No Brasil, o termo Qualidade de Energia Elétrica, vinha sendo associado às condições técnicas e a qualidade de serviços de energia elétrica fornecidos pelas concessionárias, segundo antigas portarias do DNAEE- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, e estas serão descritas na seção 2.7 a seguir, que trata de normas e limites. Neste contexto, a ANEEL, com o apoio do ONS- Operador Nacional do Sistema e demais agentes do setor elétrico, está revendo e reformulando as antigas portarias, no sentido de adequá-las ao novo modelo funcional do setor elétrico brasileiro.

2.2. Aspectos Fundamentais na Qualidade de Energia:

O conceito qualidade de energia pode ser utilizado para descrever a variação de tensão, de corrente e da frequência de um sistema elétrico. Se anteriormente, muitos equipamentos utilizados para operar o sistema, suportavam uma determinada faixa de variação destes três parâmetros. Atualmente, com o crescimento e a interligação de sistemas de energia, muitos equipamentos eletro-eletrônicos que têm sido adicionados a estes, no sentido de aumentar e de flexibilizar as capacidades de geração, transmissão e distribuição, não apresentam a mesma tolerância a tais variações destes parâmetros, deteriorando assim, os níveis de qualidade de energia elétrica dos respectivos sistemas.

Como a variação de tensão, é geralmente o mais importante fator associado à distúrbios relacionados a QEE, o nível de qualidade de energia está essencialmente relacionado com a manutenção da tensão de fornecimento próxima de suas condições

nominais, ou seja, a qualidade de energia pode ser associada diretamente à qualidade de tensão.

Como a qualidade de energia depende tanto das concessionárias de energia, quanto de seus consumidores e de fabricantes de equipamentos elétricos, alguns aspectos são fundamentais e determinantes para os níveis de QEE. Entre eles a disponibilidade e continuidade do fornecimento, a conformidade da tensão e a sensibilidade de cargas e processos frente à distúrbios. Outro ponto que também deve ser considerado, é o relacionamento com o consumidor, pois a necessidade do aumento de produtividade diante deste mercado globalizado e competitivo, acarretará em posturas cada vez mais exigentes dos consumidores.

2.3. Principais Distúrbios Associados à Qualidade de Energia:

Quando nos referimos aos problemas associados à qualidade de energia elétrica, podemos dizer que qualquer desvio ou distorção nas condições ideais da tensão fornecida, poderá representar distúrbios no sistema da concessionária e/ou nos consumidores instalados no sistema.

No cotidiano desses sistemas de energia, existe uma gama de distúrbios eletromagnéticos, onde descargas atmosféricas, manobras de equipamentos e de linhas de transmissão, bem como curtos-circuitos, são as principais causas destes fenômenos. Não podemos deixar de citar também, que os grandes e longos sistemas de transmissão são bastante vulneráveis a acidentes diversos, que ocasionam curtos-circuitos; tais como queimadas e atos de vandalismo, tais como quebra de isoladores, etc.

Dentre uma ampla variedade de distúrbios, destacam-se [23], [24] e [25]:

- Transitórios: Impulsivos e Oscilatórios;
- Variações de Curta Duração: Interrupções Transitórias, Afundamentos de Tensão (*Sags*) e Saltos de Tensão (*Swells*), estes sim, causados principalmente por curto-circuitos nos sistemas;
- Variações de Longa Duração: Interrupções Sustentadas, Subtensões e Sobretensões;

- Desequilíbrios de Tensão;
- Distorção de Forma de Onda: Harmônicos, Interharmônicos, Recortes na Tensão (*Notching*) e Ruídos;
- Flutuações de Tensão e Cintilação (*Flicker*);
- Variações de Frequência.

A figura 2.1 [23], mostra alguns destes distúrbios associados à Qualidade de Energia, onde o trecho **a**, mostra a tensão normal, o trecho **b** o surto de tensão, o trecho **c** o transitório oscilatório de tensão, o trecho **d** uma subtensão momentânea, o trecho **e** a interrupção momentânea de tensão, o trecho **f** uma sobretensão momentânea, o trecho **g** uma distorção harmônica e finalmente o trecho **h** mostrando recortes na tensão.

A Tabela 2.1, mostra o conteúdo espectral, a duração e magnitude dos distúrbios citados acima, [24] e [26].

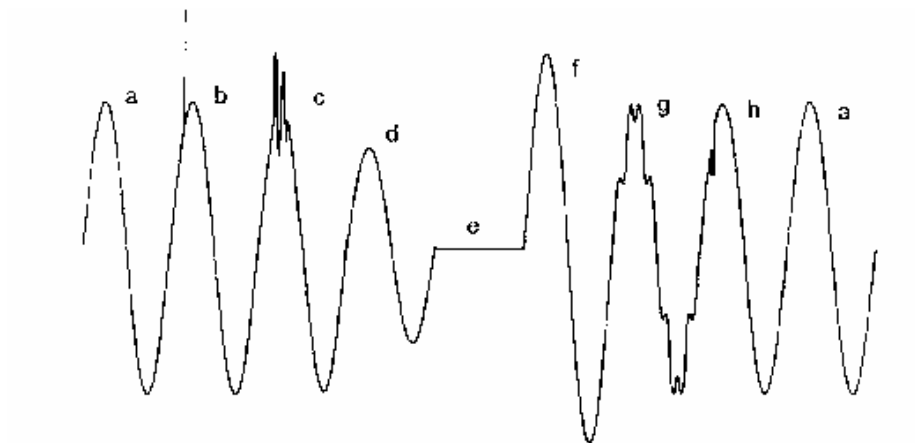


Fig.2.1. Distúrbios associados à Qualidade de Energia Elétrica

Categorias de Distúrbios	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Magnitude Típica
1. Transitórios: 1.1. Impulsivos 1.1.1. Nanosegundos 1.1.2. Microsegundos 1.1.3. Milisegundos 1.2. Oscilatórios 1.2.1. Baixa Frequência 1.2.2. Média Frequência 1.2.3. Alta Frequência	5ns tempo subida 1µs tempo subida 0.1ms tempo subida < 5 kHz 5-500 kHz 0.5-5 MHz	< 50 ns 50 ns-1ms > 1 ms 0.3-50 ms 20 µs 5 µs	0-4 pu 0-8 pu 0-4 pu
2. Variações de Curta Duração: 2.1. Instantâneas 2.1.1. Afundamento de Tensão – <i>Sag</i> 2.1.2. Salto de Tensão - <i>Swell</i> 2.2. Momentâneas 2.2.1. Interrupção 2.2.2. Afundamento de Tensão – <i>Sag</i> 2.2.3. Salto de Tensão - <i>Swell</i> 2.3. Temporárias 2.3.1. Interrupção 2.3.2. Afundamento de Tensão – <i>Sag</i> 2.3.3. Salto de Tensão - <i>Swell</i>		0.5-30 ciclos 0.5-30 ciclos 0.5ciclos-3 s 30 ciclos-3s 30 ciclos-3s 3 s-1min 3 s-1min 3 s-1min	0.1-0.9 pu 1.1-1.8 pu < 0.1 pu 0.1-0.9 pu 1.1-1.4 pu < 0.1 pu 0.1-0.9 pu 1.1-1.2 pu
3. Variações de Longa Duração: 3.1. Interrupção Sustentada 3.2. Subtensões 3.3. Sobretensões		> 1min > 1min > 1min	0.0 pu 0.8-0.9 pu 1.1-1.2 pu
4. Desequilíbrio de Tensão		Regime Permanente	0.5-2%
5. Distorção de Forma de Onda: 5.1. Harmônicos 5.2. Interharmônicos 5.3. Recortes na Tensão- <i>Notching</i> 5.4. Ruídos	0-100 th H 0-6 kHz <i>ampla faixa</i>	Reg. Perman. Reg. Perman. Reg. Perman. Reg. Perman.	0-20% 0-2% 0-1%
6. Flutuações de Tensão:	< 25Hz	Intermitente	0.1-7%
7. Variações de Frequência		< 10 s	

Tabela 2.1- Categorias e Características de Distúrbios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos.

2.4. Relação da QEE com a Compatibilidade Eletromagnética:

Neste capítulo são abordados aspectos da Qualidade de Energia, mas até o presente momento nada se abordou a respeito do conceito de Compatibilidade Eletromagnética, CEM, devido principalmente às objeções que existem em relação ao melhor termo a ser empregado nas interações existentes entre concessionárias de energia e seus consumidores. Dentre essas objeções, a questão das formulações técnicas e matemática, já citada no item 2.1.

Pois bem, da mesma forma que o termo *Qualidade de Energia* tem adquirido um certo *status* oficial junto ao IEEE-*Institute of Electrical and Electronics Engineers* [27], observou-se por outro lado, que nos documentos da principal organização responsável por um conjunto de normas internacionais em engenharia elétrica, o IEC-*International Electrotechnical Commission*, esse mesmo termo não vinha sendo utilizado, contudo referia-se ao termo *Compatibilidade Eletromagnética*, o que não vem a ser *qualidade de energia*. Entende-se, entretanto, que existe uma forte relação entre os dois termos [4].

Para se tratar da relação existente entre a compatibilidade eletromagnética e a qualidade de energia, deve-se iniciar uma análise pelas definições feitas em documentos do IEC, onde: *Compatibilidade Eletromagnética é a aptidão de um equipamento ou sistema, funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético, sem introduzir distúrbios eletromagnéticos intoleráveis à equipamentos ou sistemas situados em seu ambiente* [28] e [29].

A ausência de uma definição de consenso, quanto ao aspecto da qualidade de energia fez com que o próprio órgão empreendesse um grupo de projetos em QEE, no qual se deveria inicialmente formalizar uma norma em medições de qualidade de energia. A seguinte definição foi adotada: *Qualidade de Energia é o conjunto de parâmetros que definem as propriedades de como a energia é fornecida ao consumidor em condições normais de operação, em termos de continuidade de fornecimento e características da tensão (simetria, frequência, magnitude, forma de onda)* [30].

Analisando-se a definição de CEM, existem algumas observações a serem praticadas: a primeira diz respeito ao ambiente, tornando-se implícita a existência de uma fronteira entre os equipamentos e seu ambiente. Assim, quando se considerarm sistemas e instalações, esses criarão seus próprios ambientes e fronteiras. Caso estejam situados em um ambiente maior, conduz-se à necessidade de se empregar a distinção entre uma CEM interna ao sistema e uma CEM externa a este, resultando em uma variação da definição

acima. Considera-se, portanto, o ambiente eletromagnético criado pelo sistema, no caso de uma CEM interna ou intra-sistema, e também o ambiente eletromagnético criado por fontes externas, no caso de uma CEM externa ou inter-sistemas. O segundo ponto a ser observado são os aspectos complementares, como o controle de emissões e o controle de imunidade, pois anteriormente a prevenção de interferências promovidas entre equipamentos e sistemas vinham sendo tratadas a partir da correta operação dos mesmos. Atualmente é evidente que a *compatibilidade* significa compatibilidade em ambas direções. A terceira observação recai no fato da definição não mencionar a imposição de limites ou possíveis parâmetros e modos de acoplamento de tais distúrbios. Entende-se que os distúrbios ou interferências eletromagnéticas se devem a fenômenos de diferentes tipos, sendo então necessário o conhecimento do que é um distúrbio *tolerável*, para então definir-se o significado de um desempenho *satisfatório*.

Dessa forma, tem-se o intuito de estreitar o vínculo entre as definições apresentadas nessa seção, pois somente o conhecimento e a classificação dos ambientes eletromagnéticos segundo um conjunto de parâmetros ou limites, como magnitudes, frequências e forma de onda, das grandezas envolvidas, poderão dar suporte às soluções de problemas de compatibilidade eletromagnética, tanto interna quanto externamente a esses ambientes. Os problemas de CEM inter-sistemas, entretanto, figuram entre os responsáveis pela deterioração da qualidade nos sistemas de energia.

Definidos os ambientes eletromagnéticos e as principais perturbações em relação à tensão, procura-se buscar informações de como são caracterizadas estas perturbações, como por exemplo seu conteúdo espectral, magnitude e duração destes eventos nos sistemas elétricos. Deve-se atentar que somente uma análise global e o perfeito entendimento e monitoração das características destes distúrbios poderão resultar em soluções adequadas aos problemas de qualidade de energia elétrica [31].

2.5. Monitoração da Qualidade de Energia Elétrica:

A monitoração do sistema elétrico constitui um procedimento importante para a sua avaliação, essencial no sentido de obter elementos necessários ao diagnóstico dos problemas nesta área, bem como na determinação de alternativas de soluções dos mesmos. Desta forma, pode-se caracterizar o desempenho do sistema e, por conseguinte, estabelecer critérios e índices para a identificação de perturbações.

Assim, diante do novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro, registrar os fenômenos eletromagnéticos que ocorrem no sistema elétrico associados aos problemas de qualidade em sistemas de energia é um fator extremamente importante. Pois somente através de um diagnóstico, teremos alternativas para melhor compatibilizar os fenômenos que são intrínsecos do sistema elétrico às características de sensibilidade dos equipamentos de consumidores.

Da mesma forma, o monitoramento irá subsidiar os pareceres técnicos em assuntos relacionados a estes problemas, fornecer uma avaliação dos modelos desenvolvidos para estudos de qualidade, bem como uma avaliação do desempenho de equipamentos condicionadores de energia elétrica, usados para solucionar os problemas de QEE.

Como existe uma grande variedade de instrumentos no mercado para monitoração, a escolha do instrumento deve ser precedida de uma definição clara e precisa de seus objetivos no processo de monitoramento. Mas também é importante o conhecimento detalhado das características de operação e as limitações, como taxas de amostragem de cada instrumento empregado, como também dos programas digitais para tratamento dos sinais registrados [32].

Um documento que fornece informações, a respeito de técnicas para a correta monitoração da QEE, é o material reunido pelo IEEE em '*Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*' [24], onde são definidos os fenômenos eletromagnéticos que podem causar problemas de qualidade de energia, como também recomenda alguns métodos de medição, de armazenamento e de interpretação de sinais de eventos, além de fornecer uma extensa bibliografia referente à QEE.

Concluindo, observamos que a área de monitoração da qualidade de energia apresenta constantes desafios e se reveste de grande importância, tanto para estabelecer as reais condições de operação dos sistemas elétricos, quanto na investigação detalhada de problemas com a qualidade de energia.

2.6. Mitigação dos Problemas de QEE:

Depois de uma análise dos problemas associados à qualidade de energia, que depende essencialmente da sensibilidade dos equipamentos envolvidos, e onde cada caso deve ser tratado de forma distinta, considerando o tipo de carga e processo do consumidor. Pode-se afirmar que, em muitos casos, os problemas podem envolver sistemas dinâmicos

complexos, que podem ser variáveis no tempo, dependentes da frequência, não-lineares e de tratamento estocástico.

Se a análise não tiver uma visão global, o perfeito entendimento das características e das complexidades dos equipamentos e processos envolvidos, poderão resultar em soluções inadequadas.

Assim, nos procedimentos para análise dos problemas é necessário correlacionar os eventos que ocorrem no sistema elétrico com aqueles que ocorrem nos equipamentos e processos do consumidor, de forma que possamos diagnosticar com segurança as causas, favorecendo uma solução através de ações integradas entre a concessionária de energia elétrica, o consumidor envolvido e fabricantes de equipamentos.

Dentre estas ações, cabe às concessionárias de energia elétrica intensificar as manutenções preventivas nos equipamentos e linhas de transmissão e distribuição, no sentido de minimizar a probabilidade da ocorrência de defeitos no sistema fornecedor. Outro ponto a destacar é que tanto as concessionárias como os consumidores, no caso industriais, devem rever os ajustes e esquemas de proteção existentes nas instalações, no sentido de otimizar a sua operação e tempos de atuação.

Para isso, é imprescindível ter-se o conhecimento detalhado da operação dos equipamentos e processos industriais dos consumidores, bem como das características e sensibilidades às variações de tensão, estabelecendo assim programas de monitoração para diagnóstico ou acompanhamento dos problemas que afetam a qualidade de energia elétrica.

A Figura 2.2 mostra um procedimento geral, que pode ser adotado no diagnóstico e no encaminhamento de soluções dos problemas de QEE [32].

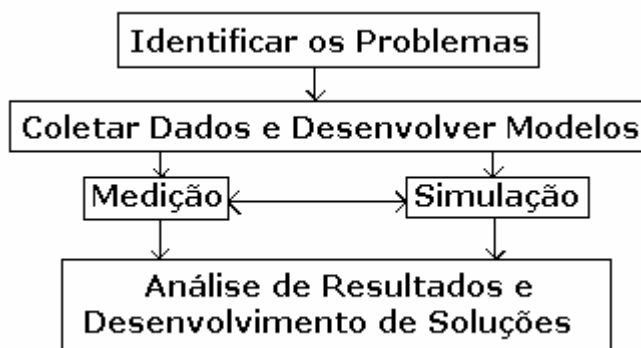


Fig. 2.2 – Procedimento Geral para Diagnósticos e Análise de Soluções

2.7. Normas e Limites:

Um considerável número de normas ainda está em desenvolvimento, pois não existe ainda um consenso internacional sobre os indicadores, parâmetros, limites e técnicas de avaliação para caracterizar adequadamente os níveis de qualidade de energia elétrica em um sistema elétrico de potência.

No Brasil, o primeiro instrumento legal, a incluir algo sobre qualidade de energia no setor elétrico foi o Código de Águas de 1934, definindo o que seria um “*serviço adequado de energia ao consumidor*”. A partir deste documento, uma série de portarias do DNAEE buscou estabelecer critérios que pudessem garantir a qualidade de fornecimento de energia aos consumidores. Dentre os documentos básicos que contribuíram para a implantação de requisitos de qualidade de energia na legislação brasileira pode-se citar as portarias do DNAEE nº 046/78, que estabeleceu os índices de continuidade para serem atingidos no fornecimento de energia aos consumidores, a DNAEE nº 047/78, que estabeleceu a faixa de variação de tensão de fornecimento, a DNAEE nº 031/80, que estabeleceu índices de continuidade para serem atendidos no suprimento de energia elétrica e que foi atualizada pela portaria DNAEE nº 293/92. A portaria DNAEE nº 163/93, ampliou o escopo dos indicadores de qualidade, estabelecendo por exemplo, indicadores para o suprimento de energia. Em 1997, o DNAEE emitiu o “*Manual de Implantação da Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica*”, estabelecendo as fórmulas dos índices de qualidade e discriminando a forma de obtenção dos parâmetros envolvidos, a coleta e tratamento dos dados [23].

Adotando como referência, a documentação básica elencada até aqui, o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, constituiu um Grupo Especial de Qualidade da Energia Elétrica -GT-QEE, aberto a todos os agentes do setor elétrico nacional, com o objetivo de discutir e sugerir indicadores e padrões da rede básica associados à Qualidade de Energia Elétrica, os quais serão incluídos nos procedimentos de rede a serem homologados pela ANEEL [1].

No anexo 1, apresentamos uma relação de algumas normas associadas à Qualidade de Energia Elétrica.

2.8. Considerações Finais:

Neste capítulo foram apresentadas definições e alguns dos importantes aspectos relacionados à qualidade em sistemas de energia elétrica, que podem auxiliar na análise, no

diagnóstico e no encaminhamento de soluções para diferentes perturbações que ocorrem nos sistemas de energia.

Assim, com base em alguns índices e em normas atualmente empregados, pode-se estabelecer uma condição de análise no sentido de avaliar os recursos existentes para a investigação dos problemas associados a eventos ou transitórios eletromagnéticos, em sua ampla faixa de frequências, sem desconsiderar o fator compatibilidade entre equipamentos e sistemas envolvidos. Uma vez que a grandeza ‘qualidade’ da energia elétrica, não pode ser exclusivamente controlada pelas concessionárias de energia, e sim considerar que a sensibilidade dos equipamentos dos consumidores é também, um dos parâmetros que afeta esta grandeza.

Portanto, tão importante quanto o estabelecimento de uma normalização que defina limites relacionados com a qualidade em sistemas de energia, é a necessidade de que as partes envolvidas estabeleçam programas de monitoramento e que visem a garantia da qualidade de energia.

Desta forma, a monitoração do sistema elétrico, constitui um procedimento importante para a avaliação da qualidade de energia, bem como do desempenho do sistema, sendo portanto, essencial para a obtenção de elementos necessários ao diagnóstico de perturbações em sistemas de energia, face a necessidade de implementação de medidas para evitar que ocorrências semelhantes sejam identificadas, e assim promovendo opções para mitigar os problemas associados a qualidade de energia.

O capítulo a seguir, trata da localização de faltas segundo a teoria de ondas viajantes, apresenta-se um relato objetivo sobre suas aplicações em sistemas de potência e o método para estimação de transitórios associados a faltas, que constituíram a base teórica para o desenvolvimento da interface gráfica e sua principal aplicação, voltada à localização de faltas em sistemas de transmissão.

Capítulo 3

A Teoria de Ondas Viajantes Aplicada à Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão

Linhas de transmissão, cabos e outros componentes dos sistemas de potência, possuem a propriedade do *comprimento elétrico* quando submetidos a súbitas mudanças de tensão, isto é, o efeito de uma súbita mudança de tensão em um determinado ponto de uma linha de transmissão, por exemplo, não ocorre, no mesmo instante, totalmente, ou em parte, em outro ponto da mesma linha de transmissão [2]. Um intervalo de tempo finito decorre para que o distúrbio seja transmitido do ponto onde se iniciou para qualquer outro ponto. Este é o princípio básico da Teoria de Ondas Viajantes [6], e que será apresentada nesse capítulo.

Faz-se também, um relato de aplicações desta teoria em esquemas de proteção, com uma comparação sucinta aos métodos que utilizam a medição da impedância, e encerrando com a metodologia de estimação de transitórios baseada nas propriedades de ondas viajantes, que forneceram o suporte teórico necessário ao desenvolvimento de nosso trabalho, visando a localização de faltas em sistemas de transmissão.

3.1. Princípios Básicos:

As ondas viajantes em linhas de transmissão, comumente conhecidas como surtos, surgem a partir de inúmeras causas, das quais as mais comuns são as faltas, as operações de chaveamento e as descargas atmosféricas.

Para um melhor entendimento da teoria de ondas viajantes, toma-se como ponto inicial uma linha de transmissão semi-infinita, onde não haja atenuações e distorções,

como apresentado na figura 3.1. Esta figura mostra uma linha de transmissão ideal e sua representação aproximada, considerando um condutor aéreo acima de uma terra perfeitamente condutora [2].

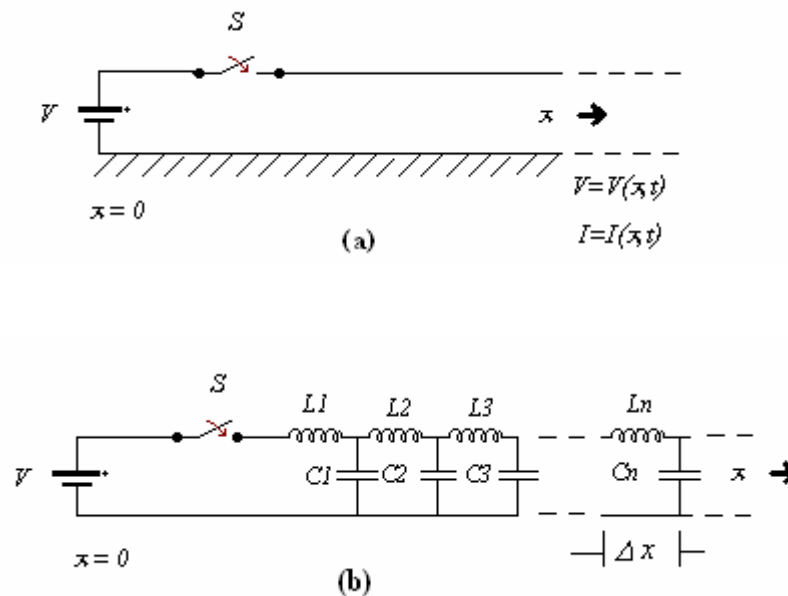


Fig. 3.1. (a) Linha de Transmissão Aérea Ideal (b) Representação Aproximada da Linha de Transmissão.

Como podemos observar, esta linha de transmissão apresenta os parâmetros indutância e capacitância continuamente distribuídos, sendo constituída de pequenas seções de comprimento Δx , onde cada seção tem uma indutância $L \cdot \Delta x$ e uma capacitância $C \cdot \Delta x$. As constantes de linha L e C são por unidade de comprimento do condutor.

Assim, para um incremento de comprimento da linha pode-se escrever que:

$$\frac{1}{2} L I^2 \cdot \Delta x = \frac{1}{2} C V^2 \cdot \Delta x \quad (3.1)$$

Rearrajando a equação (3.1), tem-se:

$$V = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot I = Z_s \cdot I \quad (3.2)$$

onde Z_s é chamada impedância de surto.

Como Z_s é real e dimensionalmente medida em *ohms*, as ondas de corrente e tensão estão em fase. Assim, cada ponto na onda de tensão é proporcional ao ponto correspondente na onda de corrente, sendo que o fator de proporcionalidade é Z_s . Impedâncias de surto típicas de linhas de transmissão em sistemas de potência, podem ser encontradas da ordem de 300 a 500 ohms [2] [11].

Do ponto de vista matemático, uma onda viajante, pode por exemplo, ser definida como sendo:

$$V(x,t) = F\left(t - \frac{x}{u}\right) \quad (3.3)$$

Onde V , a tensão, é função do tempo t e da posição no condutor definida por uma distância x , a partir de um ponto de referência. Na mesma expressão (3.3), a distância x é relacionada a um tempo equivalente, pela velocidade de propagação da onda viajante definida por:

$$u = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \quad (3.4)$$

Assim, para qualquer posição ao longo do condutor $x = x_n$, um surto de tensão pode ser definido como:

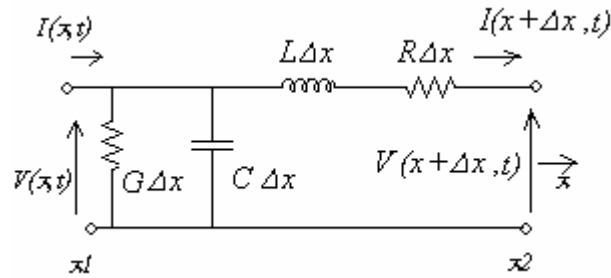
$$V(x_n,t) = F\left(t - \frac{x_n}{u}\right) \quad (3.5)$$

E este surto não aparece nesta posição até que seja decorrido um tempo $t = x_n/u$, após o início de propagação da onda em $x = 0$. A velocidade de propagação u numa linha de transmissão aérea é aproximadamente a velocidade da luz, isto é, 3×10^8 m/s.

3.2. Equações da Linha de Transmissão:

Após considerações iniciais em função de princípios básicos de ondas viajantes, apresentamos nesta seção como são obtidas as equações que relacionam tensões e correntes para ondas viajantes em linhas de transmissão.

O circuito equivalente utilizado para a dedução das equações da linha de transmissão, na teoria de ondas viajantes é apresentado na figura 3.2 [2].



$$\begin{aligned}
 L &= \text{Henrys/metro} \\
 C &= \text{Farads/metro} \\
 R &= \text{Ohms/metro} \\
 \Delta x &= x_2 - x_1
 \end{aligned}$$

Fig. 3.2. Circuito Elementar de uma Linha de Transmissão.

Assim, as equações de corrente e tensão para este circuito podem ser escritas da seguinte maneira:

$$I(x + \Delta x, t) = I(x, t) - G \Delta x V(x, t) - C \Delta x \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$V(x + \Delta x, t) = V(x, t) - L \Delta x \frac{\partial I(x + \Delta x, t)}{\partial t} - R \Delta x I(x + \Delta x, t) \quad (3.7)$$

A corrente e a derivada de primeira ordem da corrente podem ser expandidas numa Série de Taylor:

$$I(x + \Delta x, t) \cong I(x, t) + \frac{\partial I(x, t)}{\partial x} \Delta x + \dots \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial I(x + \Delta x, t)}{\partial t} \cong \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial^2 I(x, t)}{\partial x \partial t} \Delta x + \dots \quad (3.9)$$

Substituindo-se as equações (3.8) e (3.9) na equação (3.7) da tensão, e desprezando-se os termos de ordem superior, obtém-se:

$$V(x + \Delta x, t) - V(x, t) = -L \Delta x \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} - R \Delta x I(x, t) - L \Delta x^2 \frac{\partial^2 I(x, t)}{\partial x \partial t} - R \Delta x^2 \frac{\partial I(x, t)}{\partial x} \quad (3.10)$$

Dividindo-se a equação (3.10) por Δx , e tomando-se o limite quando $\Delta x \rightarrow 0$, tem-se:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{V(x+\Delta x, t) - V(x, t)}{\Delta x} = \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} \quad (3.11)$$

Então, obtemos:

$$-\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = R.I(x, t) + L \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} \quad (3.12)$$

Da mesma forma, obtém-se uma equação similar para a corrente, utilizando a equação (3.6), que dividida por Δx , e tomando-se o limite quando $\Delta x \rightarrow 0$, resulta em:

$$\frac{I(x+\Delta x, t) - I(x, t)}{\Delta x} = -G.V(x, t) - C \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \quad (3.13)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{I(x+\Delta x, t) - I(x, t)}{\Delta x} = \frac{\partial I(x, t)}{\partial x} \quad (3.14)$$

Então, tem-se:

$$-\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = G.V(x, t) + C \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \quad (3.15)$$

As equações (3.12) da tensão e (3.15) da corrente, podem ser escritas de maneira simplificada, considerando que $V=V(x, t)$ e $I=I(x, t)$.

$$-\frac{\partial V}{\partial x} = R.I + L \frac{\partial I}{\partial t} \quad (3.16)$$

$$-\frac{\partial I}{\partial x} = G.V + C \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.17)$$

A partir da equação (3.16), tem-se:

$$-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = L \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} + R \frac{\partial I}{\partial x} \quad (3.18)$$

$$-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = L \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial I}{\partial x} \right] + R \frac{\partial I}{\partial x} \quad (3.19)$$

Substituindo-se o valor de $\frac{\partial I}{\partial x}$ dado pela equação (3.17) na equação (3.19), temos:

$$-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = L \frac{\partial}{\partial t} \left[-G.V - C \frac{\partial V}{\partial t} \right] + R \left[-G.V - C \frac{\partial V}{\partial t} \right] \quad (3.20)$$

$$-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -L.G \frac{\partial V}{\partial t} - L.C. \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - R.G.V - R.C. \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.21)$$

Finalmente, ao se ordenar a equação (3.21), tem-se:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = R.G.V + [L.G + R.C] \frac{\partial V}{\partial t} + L.C. \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (3.22)$$

A partir da equação (3.17), tem-se:

$$-\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = G \frac{\partial V}{\partial x} + C \frac{\partial^2 V}{\partial t \partial x} \quad (3.23)$$

$$-\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = G \frac{\partial V}{\partial x} + C \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial V}{\partial x} \right] \quad (3.24)$$

Substituindo-se o valor de $\frac{\partial V}{\partial x}$ dado pela equação (3.16) na equação (3.24), temos:

$$-\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = -G \left[L \frac{\partial I}{\partial t} + R.I \right] - C \frac{\partial}{\partial t} \left[L \frac{\partial I}{\partial t} + R.I \right] \quad (3.25)$$

$$-\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = -L.G. \frac{\partial I}{\partial t} - R.G.I - L.C. \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} - R.C. \frac{\partial I}{\partial t} \quad (3.26)$$

Finalmente, ao se ordenar a equação (3.26), tem -se:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = R.G.I + [L.G + R.C] \frac{\partial I}{\partial t} + L.C. \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (3.27)$$

A solução das equações (3.22) e (3.27) fornece como resultado, funções que descrevem o comportamento da tensão e da corrente ao longo da linha de transmissão.

3.3. Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão:

As ondas viajantes ou surtos em linhas aéreas de potência viajam à velocidade da luz, propagam-se a partir do ponto de falta em ambas direções e consistem de uma *onda de tensão* e uma *onda de corrente* relacionadas através da impedância de surto da linha Z_s , como foi citado anteriormente.

Esta simples relação entre ondas de tensão e a corrente existe em todos os pontos ao longo das linhas aéreas, exceto nas discontinuidades, tais como terminais da linha e faltas. Nos terminais da linha, as ondas incidentes e refletidas de tensão e corrente produzem um somatório de ondas de tensão e corrente. Sabe-se ainda, que o estudo de ondas viajantes torna-se bastante complexo, se considerarmos que num sistema de potência, temos uma série de linhas interligadas e inúmeros terminais. Portanto, uma forma adequada e simplificada para o estudo de ondas viajantes foi proposto por Bewley [6], onde as ondas viajantes iniciadas por uma falta interna em uma linha de transmissão, podem ser representadas por um diagrama de treliças, como mostra a figura 3.3, essa representação gráfica dá margem a uma apresentação mais clara ao estudo de ondas viajantes, utilizando-se diagramas de espaço-tempo. Estes transitórios estão superpostos as correntes e tensões em regime permanente. Assim, as ondas viajantes de tensão e corrente podem então ser encontradas pela subtração dos valores de regime permanente a partir das saídas dos transdutores, ou seja, obtendo-se assim os valores incrementais de tensão e corrente.

As relações entre tensões e correntes para ondas viajantes em linhas de transmissão, respectivamente as equações (3.22) e (3.27) são denominadas *Equações dos Telegrafistas*, que reescritas de forma simplificada desconsiderando-se as perdas ($R=0$ e $G=0$), tornam-se as seguintes equações de ondas [2] e [33]:

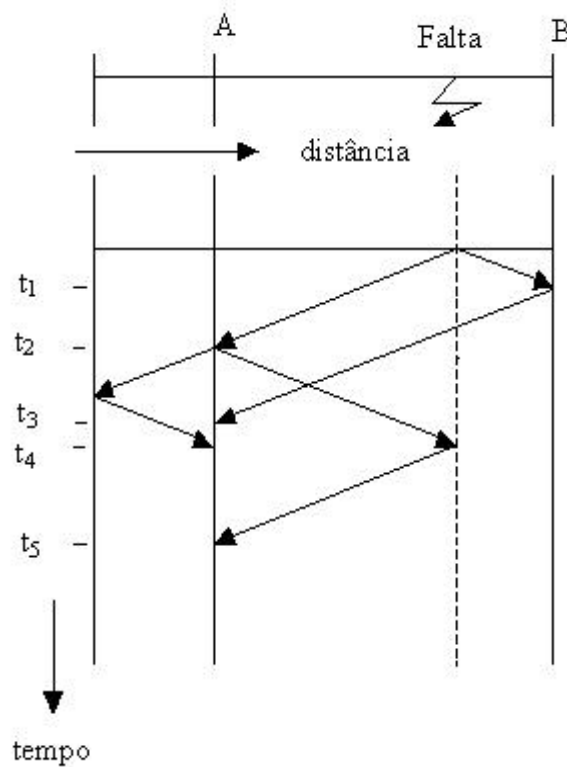


Fig. 3.3. Diagrama de Treliças de Bewley com a propagação de transitórios de falta entre as subestações A e B.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (3.29)$$

onde L e C são a indutância e a capacitância da linha de transmissão, por unidade de comprimento.

A solução de D'Alemberts para as equações de onda são expressas em termos de uma onda que trafega na direção positiva ou direta F_1 e outra que trafega na direção negativa ou reversa F_2 :

$$V(x,t) = \frac{1}{2} [F_1(ut - x) + F_2(ut + x)] \quad (3.30)$$

$$I(x,t) = \frac{1}{2Z_s} [F_1(ut - x) - F_2(ut + x)] \quad (3.31)$$

A incidência de uma falta na linha de transmissão causará uma tensão pós-falta e uma corrente pós-falta diferente de uma tensão e corrente de condição de pré-falta em regime permanente. Como citado anteriormente, os valores incrementais de tensão e corrente são prontamente obtidos a partir dos sinais de tensão e corrente nos transdutores, medidos pós-falta e subtraindo as quantidades de tensão e corrente senoidais pré-falta em regime permanente.

A rede com falta pode ser descrita então, utilizando-se o princípio da superposição, pois a superposição dos sinais de pré-falta e sinais incrementais de tensão Δv e de corrente Δi produzirão os sinais de pós-falta.

Esses sinais incrementais, podem ser considerados como sendo os sinais de ondas viajantes, assim temos:

$$\Delta v = V(0,t) \quad (3.32)$$

$$\Delta i = I(0,t) \quad (3.33)$$

As amplitudes de tensão direta e reversa podem então ser encontradas a partir das tensões e correntes incrementais utilizando-se as equações (3.30) e (3.31), que produz:

$$V_i = \frac{\Delta v - Z_s \Delta i}{2} \quad (3.34)$$

$$V_r = \frac{\Delta v + Z_s \Delta i}{2} \quad (3.35)$$

Observe que as equações (3.34) e (3.35) são independentes da impedância da fonte ou carga no ponto de proteção ou releamento.

Numa linha de transmissão polifásica, os elementos mútuos de uma *matriz de impedância de surto*, permite que as ondas viajantes sejam acopladas através das fases, assim para uma linha de transmissão de n fases, as ondas viajantes podem ser analisadas em n modos independentes de propagação, como foi proposto por Wedepohl [34]. As matrizes de impedância e admitância que descrevem uma linha polifásica são

diagonalizadas a partir das matrizes de transformação modal de corrente e tensão, construídas a partir dos autovetores. De acordo com a teoria de modos naturais [35], utilizando-se a transformação modal, uma linha trifásica pode ser decomposta em três modos independentes de propagação. Um detalhamento matemático dessas matrizes de transformação, segundo a propagação modal em uma linha de transmissão trifásica completamente transposta, pode ser acompanhado no anexo 2.

Na decomposição modal, as quantidades transformadas contém um *modo de terra* e dois modos aéreos de propagação. Os sinais dos modos aéreos viajam próximos a velocidade da luz e os sinais do modo de terra viajam numa velocidade bem mais baixa e com uma alta atenuação. A velocidade do modo de terra é dependente da frequência devido à distribuição não-uniforme das correntes de terra. Os modos aéreos não causarão um significativo erro sobre uma determinada faixa de frequência, principalmente se a configuração da linha de transmissão for horizontal ao plano longitudinal de terra, podendo assim, serem considerados como independentes da frequência [36] e [37].

No domínio da frequência, as equações diferenciais parciais descrevendo os transitórios de tensão e corrente, podem ser reduzidas a equações diferenciais ordinárias, assim as equações para uma linha de n fases tornam-se [33]:

$$\frac{d[V]}{dx} = -[Z_l] \cdot [I] \quad (3.36)$$

$$\frac{d[I]}{dx} = -[Y_l] \cdot [V] \quad (3.37)$$

onde $[Z_l]$ e $[Y_l]$ são as matrizes de impedância e admitância da linha, e como ambas são simétricas, as equações (3.36) e (3.37) podem ser combinadas para produzir:

$$\frac{d^2[V]}{dx^2} = [P] \cdot [V] \quad (3.38)$$

$$\frac{d^2[I]}{dx^2} = [P]^t \cdot [I] \quad (3.39)$$

onde

$$[P] = [Z_l] \cdot [Y_l] \quad (3.40)$$

$$[P]^t = [Y_l] \cdot [Z_l] \quad (3.41)$$

Em geral, a matriz $[P]$ não é uma matriz diagonal, o que significa que não existe uma solução simples para as equações (3.38) e (3.39). Assim, para permitir uma solução simples, faz-se o uso das variáveis modais, para isto, precisamos determinar as matrizes de transformação $[S]$ para tensão e $[Q]$ para corrente, que relacionam as variáveis modais com as variáveis de fase.

Uma vez que $[\lambda]$ é uma matriz diagonal de autovalores onde:

$$[I] = [S]^{-1} \cdot [P] \cdot [S] \quad (3.42)$$

A matriz de transformação $[S]$, pode então ser formada pelos autovetores de $[P]$, como é demonstrado no anexo 2.

Utilizando a transformação das tensões de fase $[V]=[S][V_m]$, a equação (3.38) torna-se:

$$\frac{d^2[V_m]}{dx^2} = [S]^{-1} \cdot [P] \cdot [S][V_m] \quad (3.43)$$

similarmente se,

$$[I] = [Q]^{-1} \cdot [P]^t \cdot [Q] \quad (3.44)$$

e utilizar $[I]=[Q][I_m]$, a equação (3.39) torna-se:

$$\frac{d^2[I_m]}{dx^2} = [Q]^{-1} \cdot [P]^t \cdot [Q][I_m] \quad (3.45)$$

As equações (3.43) e (3.45) tem soluções gerais, dadas por:

$$[V_m] = [A][e^{-g^x}] + [B][e^{2x}] \quad (3.46)$$

$$[I_m] = [C][e^{-g^x}] + [D][e^{2x}] \quad (3.47)$$

onde os modos definidos pelas transformações apresentadas acima, tem portanto um coeficiente de propagação γ_i dado pela equação (3.48).

$$g_i^2 = I_{ii} \quad (3.48)$$

As ondas modais viajantes no sentido direto são dadas por:

$$[V_{mi}] = [A][e^{-g^x}] \quad (3.49)$$

$$[I_{mi}] = [C][e^{-g^x}] \quad (3.50)$$

As ondas modais viajantes no sentido reverso são dadas por:

$$[V_{mr}] = [B][e^{g^x}] \quad (3.51)$$

$$[I_{mr}] = [D][e^{g^x}] \quad (3.52)$$

Estas soluções de ondas transitórias podem então ser substituídas nas equações (3.36) e (3.37), definindo:

$$[V_{mi}] = [Z_m][I_{mi}] \quad (3.53)$$

$$[V_{mr}] = -[Z_m][I_{mr}] \quad (3.54)$$

onde,

$$[Z_m] = -[g][S]^{-1} \cdot [Z_l] \cdot [Q] \quad (3.55)$$

A impedância modal $[Z_m]$ é uma matriz diagonal e os transitórios modais são independentes.

As equações (3.53) e (3.54), podem também ser escritas na forma:

$$[V_i] = [Z_s][I_i] \quad (3.56)$$

$$[V_r] = -[Z_s][I_r] \quad (3.57)$$

onde $[Z_s]$ é a matriz impedância de surto de fase, que permite que as ondas viajantes sejam acopladas através das fases, sendo obtida através:

$$[Z_s] = [S][Z_m][Q]^{-1} \quad (3.58)$$

A substituição das equações (3.53) e (3.54) nas equações (3.46), (3.32) e (3.47) em $x=0$, isto é no ponto de releamento ou do barramento, produzirá:

$$[V_{mi}] = \frac{[S]^{-1}[\Delta v] - [Z_m][Q]^{-1}[\Delta i]}{2} \quad (3.59)$$

$$[V_{mr}] = \frac{[S]^{-1}[\Delta v] + [Z_m][Q]^{-1}[\Delta i]}{2} \quad (3.60)$$

ou

$$[V_i] = \frac{[\Delta v] - [Z_s][\Delta i]}{2} \quad (3.61)$$

$$[V_r] = \frac{[\Delta v] + [Z_s][\Delta i]}{2} \quad (3.62)$$

Estas equações são, portanto, utilizadas para encontrar as ondas viajantes transitórias incidentes e refletidas no ponto de releamento.

Dentre algumas observações, a matriz de transformação modal depende da configuração e condutividade dos condutores, bem como da terra. Outro aspecto a ser considerado, é que a matriz de transformação modal e a matriz de impedância são dependentes da frequência e incluem termos complexos. Mas alguns estudos tem mostrado [37], [38] e [39], que a variação de frequência é desprezível, bem como observações que confirmam que a matriz de transformação modal em linhas de transmissão de Extra Alta Tensão (EAT), podem ser representadas com uma boa aproximação, por quantidades reais constantes, calculadas numa faixa de frequência de 50-5000 Hz [40].

Concluindo, entendemos que as ondas viajantes em linhas de transmissão consistem, portanto, de modos de propagação independentes e esses modos dependem das características das linhas. Estas também, podem ser deduzidas a partir de sinais incrementais transitórios e compondo assim a base para releamentos de ultra alta velocidade em linhas de transmissão de EAT [33] e [39].

3.4. A Aplicação da Teoria de Ondas Viajantes em Esquemas de Proteção:

Pesquisadores em sistemas de potência têm investigado técnicas de localização de faltas há muitos anos. Mas até recentemente, muitas companhias de energia tinham escolhido fazer pouco ou nenhum investimento em equipamentos de localização de faltas

em linhas de transmissão, argumentando que como a maioria das faltas são transitórias, elas não requeriam localização. Além disso, eles argumentavam que a precisão dos resultados fornecidos pelos métodos de localização de falta baseados em *medição de impedância*, não eram confiáveis o suficiente para justificar o envio de uma equipe de manutenção para confirmar a localização de faltas transitórias. Consequentemente, as atividades para localização de faltas eram iniciadas, somente quando uma falta era permanente e assim uma ação era inevitável. Estas atitudes estão mudando agora com as políticas de privatização e desregulamentação das companhias fornecedoras de eletricidade em todo o mundo. Assim, diante dessa nova realidade e da crescente complexidade de sistemas de transmissão de energia, novas pesquisas dirigidas ao estudo e a aplicação de técnicas de localização de faltas começaram a ter lugar de destaque neste novo cenário, buscando primeiramente garantir a qualidade no fornecimento de energia e os demais aspectos relacionados a estabilidade destes sistemas. Portanto, atendendo a estas expectativas, realizou-se um estudo preliminar das características que identificam os métodos para localização de faltas em sistemas de transmissão, para daí então, termos condições de justificarmos a aplicação da teoria de ondas viajantes em nossa proposta.

Os métodos contemporâneos para localização de faltas em linhas aéreas e cabos subterrâneo podem ser classificados em dois tipos fundamentais: os métodos baseados na medida de impedância da linha pós-falta e os métodos baseados na medição de componentes de ondas viajantes geradas pela falta, como mostra a figura 3.4.

Inicialmente, destacamos uma avaliação das características dos métodos que utilizam ondas viajantes, pois a capacidade dos métodos de ondas viajantes em superar as imprecisões e limitações dos métodos de impedância foi reconhecida na década de 50, quando muitos sistemas experimentais foram propostos. Embora esses sistemas forneçam melhor precisão que qualquer outro previamente disponível, eles foram gradualmente abandonados devido a problemas de confiabilidade e manutenção, resultando na perda de interesse e confiança nestas técnicas.

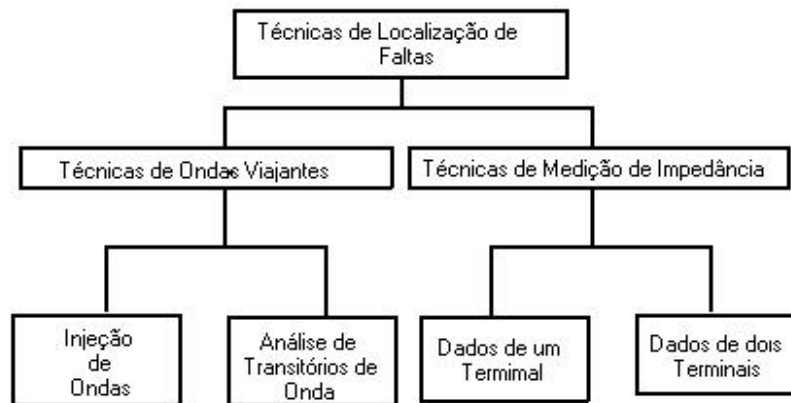


Fig. 3.4. Classificação das Técnicas de Localização de Falhas.

Hoje, mais de 50 anos depois, a teoria de ondas viajantes esta mais uma vez sendo aplicada à localização de faltas em linhas aéreas. O reaparecimento dos métodos de ondas viajantes se deve a muitos fatores. O primeiro é a demanda de mercado, para uma localização de falta rápida e precisa, algo estrategicamente importante em linhas de transmissão de alta de tensão muito longas, muitas vezes com compensação série ou com um perfil de impedância não-homogênea, para as quais sabemos que os localizadores de falta baseados em impedância são inadequados. O segundo fator é o resultado da reavaliação do comportamento das ondas viajantes em sistemas de potência e, em particular, como elas podem ser detectadas e utilizadas para os propósitos de localização de faltas. Os demais fatores, os quais tem feito o ressurgimento possível, são os recentes avanços técnicos na aquisição de dados em alta velocidade, tempo de sincronização pela utilização de GPS (*Global Positioning Systems*) e as melhorias em sistemas de controle e comunicação remotos.

Teoricamente, a característica das ondas viajantes geradas por faltas contém informação sobre a falta e podem ser utilizados para localizá-la precisamente. A utilização da propagação de ondas viajantes na proteção foi primeiramente proposto por Dommel e Michels em 1978, para detecção de faltas em linhas de transmissão [40]. Então, outros artigos foram publicados empregando essa técnica, com o propósito de localização de faltas, [10] e [11] entre tantos. A idéia básica destes esquemas é a determinação do tempo necessário para uma onda injetada na linha viajar entre o ponto de envio e o ponto de falta. Uma outra maneira, que tem sido introduzida é a obtenção e análise de transitórios de ondas, gerados nas correntes e tensões durante a falta, [15] e [41]. Embora, os esquemas

baseados em ondas viajantes forneçam uma ferramenta rápida para a detecção de falta e apresentar uma solução para o problema da localização de falta, algumas deficiências surgiram nestes esquemas. A propagação pode ser excepcionalmente afetada pelos parâmetros e a configuração do sistema. Outras dificuldades, surgem quando temos faltas próximas aos barramentos e para aquelas faltas ocorrendo próximo ao zero no ângulo de incidência da tensão. As dificuldades são também devido à complexidade das simulações, especialmente quando os parâmetros do sistema são dependentes da frequência, [9] e [10].

Outra categoria de métodos de localização de faltas, que durante anos tem promovido esforços consideráveis, são os métodos baseados em impedância, que tem a vantagem de depender somente da informação disponível via transdutores de medição instalados. Também, a facilidade de implementação e simulação, e consequente avaliação, são outras vantagens. Muitos artigos tem sido publicados incluindo algoritmos baseados em dados medidos em um terminal, [7] e [8], e outros algoritmos baseados em dados medidos em ambos terminais da linha de transmissão, que necessitam de elos de comunicação e equipamentos de amostragem sincronizados, [43] e [44]. Contudo, como qualquer outro método baseado na medição da frequência do sistema, eles sofrem limitações devido ao caminho da resistência de falta, carregamento da linha, parâmetros da fonte, etc. Além disso, esses métodos são limitados pela banda de passagem de transdutores convencionais, em particular os transformadores de potencial capacitivos (TPC's) [42].

Outro aspecto a ser considerado, são as diferenças notáveis existentes entre as precisões, que resultaram de estudos de simulação e aquelas resultantes no campo real. Em Gale *et al* um alto percentual de erro tem sido encontrado (acima de 23%) para estes algoritmos no campo real [10] e [42]. Alguns fatores contribuem para esses erros, incluindo as simplificações na simulação associadas a impedância da fonte, impedância da falta e correntes de falta, bem como as variações dos parâmetros do sistema que também afetam fortemente estas precisões.

Portanto, fica evidente a necessidade de investigação dessas situações, e é algo que vem sendo desenvolvido por muitos pesquisadores, e isto, foi um dos principais fatores que motivaram o nosso trabalho.

3.5. A Estimação de Transitórios Associadas a Falhas:

O desempenho de um sistema elétrico, pode ser avaliado através do monitoramento propriamente dito, da qualidade de energia, como também através de estudos de predição estocástica. É claro que a monitoração do sistema pode dar um quadro mais preciso dos tipos de distúrbios, mas a predição poderá fornecer dados em um tempo relativamente mais curto. Existem diferentes métodos para o estudo de avaliações estocásticas, entre estes, temos os métodos de localização de faltas em sistemas de potência.

Como a base deste trabalho, é o método apresentado por David W. P. Thomas, no artigo “*A Novel Transmission-Line Voltage Measuring Method*” [16], pretende-se nesta seção, descrever a metodologia empregada para estimar transitórios associados à faltas em sistema de transmissão, no sentido de proporcionar uma melhoria na localização destas, bem como na confiabilidade dos esquemas de proteção destes sistemas.

3.5.1. Considerações Iniciais:

O método é aplicado ao monitoramento de linhas de transmissão, e o mesmo busca estimar transitórios de tensão a partir somente de transitórios de corrente. Esta metodologia baseia-se nas propriedades de ondas viajantes, que surgem em linhas de transmissão, como resultado de faltas, operações de chaveamento ou energização, e até mesmo de descargas atmosféricas.

Atualmente, a maioria dos esquemas de proteção, medição e controle emprega dois transdutores em cada fase, para medir tensão e corrente. Como os transdutores de tensão, são essencialmente circuitos capacitivos sintonizados na frequência do sistema, os mesmos possuem uma estreita largura de faixa de resposta em frequência. E isto, vem limitando a aplicação de novas técnicas para proteção e controle em sistemas de potência.

Os benefícios do método proposto fornecem um suporte para os transdutores de tensão convencionais e também melhoram a largura de faixa na medição dos transitórios de tensão, permitindo que a proteção que emprega ondas viajantes de alta velocidade, possa ser utilizada em sistemas de potência.

3.5.2. Princípio do Método:

Se a impedância de barra para terra Z_g e a corrente i para terra na barra são conhecidas, então a tensão v na barra será dada por:

$$v = Z_g \cdot i \quad (3.63)$$

Assim, é possível estimar a tensão na barra, a partir da medição de sua corrente para terra e conhecendo-se o valor de impedância da barra. Como esta impedância de barra para terra não pode ser pré-definida, pois depende de cargas locais e linhas de transmissão conectadas, então, utiliza-se uma técnica baseada nas propriedades de ondas viajantes, e a impedância de barra pode inicialmente ser estimada, de forma que a equação (3.63) possa ser utilizada.

Como a amplitude de onda viajante de tensão em uma linha de transmissão está relacionada unicamente à amplitude da onda viajante de corrente e à impedância de surto de linha. Para uma linha monofásica, a onda viajante de tensão v_t é dada por [16] e [45]:

$$v_t = \pm Z_s \cdot i_t \quad (3.64)$$

onde Z_s é a impedância de surto da linha, i_t é a onda viajante de corrente, e o sinal depende da direção de propagação do transitório.

Em geral, as correntes e tensões nas linhas de transmissão, serão o resultado de muitas ondas propagando-se e assim a tensão sobreposta total, não será como dada na equação (3.64). Então, para uma onda viajante incidente em uma barra, como mostrado na figura 3.5:

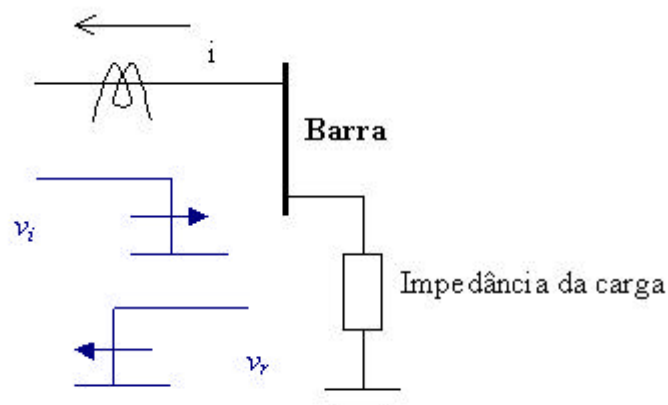


Fig.3.5. Ondas incidentes e refletidas de tensão na carga.

A tensão resultante total v na barra, será a soma das amplitudes de tensão da onda incidente e refletida v_i e v_r , respectivamente, as quais são dadas por:

$$v = v_i + v_r = [i_r - i_i].Z_s \quad (3.65)$$

A corrente da linha de transmissão na barra, será a soma das correntes incidentes e refletidas i_i e i_r , respectivamente, dando:

$$i = i_i + i_r \quad (3.66)$$

Assim, de maneira geral, a relação v/i em uma linha de transmissão não é igual a impedância de surto da linha. Contudo, se considerarmos um barramento geral, com muitas linhas de transmissão conectadas, como mostrado na figura 3.6. Caso um transitório seja provocado na linha 1, o transitório inicial de ondas viajantes neste barramento mostra que inicialmente, existirão dois sinais de ondas viajantes nesta linha, devido às ondas incidente e refletida, e somente um transitório de onda viajante em todas outras, devido à transmissão do transitório para estas linhas.

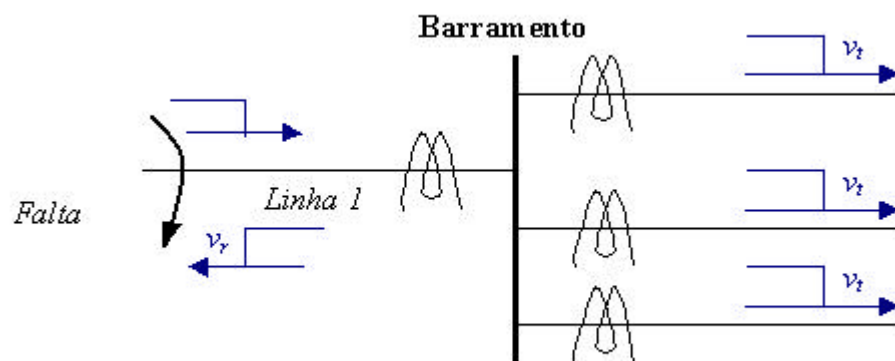


Fig. 3.6. Direção de propagação das ondas de tensão incidente, refletida e transmitidas vistas do barramento devido a uma falha na Linha 1.

Desta forma, a tensão transitória pode então ser estimada a partir da equação (3.64), usando as correntes de linha em todas as linhas de transmissão, exceto na linha em que o transitório foi originado. Evidentemente, que depois de um curto intervalo de tempo, todas as linhas de transmissão conterão mais que um transitório de onda viajante, devido às reflexões em terminações remotas. Portanto, existe uma estreita janela na qual a tensão de

barra e a corrente para terra são conhecidas e a impedância transitória do barramento pode ser encontrada. Com esta impedância estimada, é possível obter a tensão da barra a partir da equação (3.63) para um período, tipicamente de um ciclo, o que permitirá o emprego de equipamentos de proteção e controle baseado em quantidades sobrepostas.

A corrente total para terra da barra (devida às cargas ou às fontes), pode ser medida diretamente usando um transformador de corrente, ou pode ser encontrada a partir das correntes nas linhas de transmissão, aplicando a lei das correntes de Kirchoff, como na equação (3.67):

$$i_{\text{barramento}} + \sum_{\text{linhas}} i = 0 \quad (3.67)$$

O método proposto em [16], tem então, as seguintes etapas:

1. Estimar primeiro a tensão da barra e a corrente para terra usando as equações (3.64) e (3.67);
2. A partir dos valores tensão e corrente estimados, estimar a impedância da barra para terra;
3. Uma vez que a impedância é estabelecida, continuar obtendo estimativas da tensão de barra utilizando a equação (3.63).

Nas linhas de transmissão com multicondutores, como já foi relatado neste capítulo, os transitórios de ondas viajantes propagam-se como modos independentes, onde cada tensão modal está relacionada com a corrente modal através da impedância de surto modal. Os transitórios são primeiramente transformados para quantidades modais, onde a tensão modal $[V_m]$ e a corrente modal $[I_m]$ são dados por:

$$[V_m] = [S]^{-1} [V_f] \quad (3.68)$$

$$[I_m] = [Q]^{-1} [I_f] \quad (3.69)$$

onde $[V_m]$ e $[I_m]$ são matrizes vetores de tensões e correntes, respectivamente, e $[S]$ e $[Q]$ são matrizes de transformação modal de tensão e corrente, respectivamente. Para um sistema trifásico $[S]$ e $[Q]$ são matrizes 3 x 3, resultando em três modos de propagação.

A escolha adequada de $[S]$ e $[Q]$, faz com que correntes e tensões modais propaguem-se como modos independentes e se relacionem por:

$$[V_m] = \pm [Z_m][I_m] \quad (3.70)$$

onde o sinal depende da direção de propagação dos transitórios e $[Z_m]$ é a matriz de impedância de surto modal, a qual é uma matriz diagonal.

Então, cada corrente modal deve também satisfazer a Lei de Correntes de Kirchoff dada pela equação (3.67), o que resulta em:

$$[I_m]_{barramento} + \sum_{linhas} [I_m] = 0 \quad (3.71)$$

Para um sistema de transmissão trifásico, suas tensões modais são estimadas para linha conectada à barra usando a equação (3.70), e então, a impedância modal de barra é estimada, utilizando a corrente de barra encontrada a partir da equação (3.71).

Em sistemas de potência é comum fazer a aproximação de que as três fases são perfeitamente balanceadas; e as linhas de transmissão são perfeitamente transpostas, de forma que todas capacitâncias e indutâncias mútuas são as mesmas. Neste caso, as matrizes de transformação de corrente e tensão são idênticas ($[S] = [Q]$), ver anexo2.

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

3.6. Considerações Finais:

Neste capítulo foram apresentadas considerações a respeito dos temas que constituíram o nosso trabalho, e que tem na aplicação da teoria de ondas viajantes sua principal característica, e aliada a esta, uma metodologia de estimação de transitórios.

A partir dos princípios básicos da teoria de ondas viajantes e do equacionamento de uma linha de transmissão, foram apresentadas as relações entre tensões e correntes para ondas viajantes em sistemas de transmissão, e como essa metodologia vem sendo

investigada e aplicada em esquemas de proteção, inclusive num comparativo preliminar com os métodos que utilizam a medição de impedância. Em seguida, foi apresentada a metodologia de estimação de tensões transitórias associadas a faltas [16], onde as tensões são estimadas através de correntes transitórias. Essa metodologia foi implementada e contribuiu também para o desenvolvimento da ferramenta computacional utilizada em nossa pesquisa, que por sua vez, pode perfeitamente ser aplicada na análise comparativa de transitórios de alta frequência em um sistema de transmissão, como também auxiliar na identificação e na localização de faltas nestes sistemas.

No capítulo seguinte, será apresentado a estrutura do *software* EMTP-ATP e também algumas considerações a respeito do editor gráfico ATPDraw, utilizados para a análise de transitórios devido a curto-circuitos em sistemas elétricos de potência, bem como, um detalhamento da modelagem dos sistemas teste do *Scottish Power* britânico e da Eletrosul no sistema brasileiro, utilizados no desenvolvimento de nossa proposta.

Capítulo 4

O EMTP/ATP para Análise de Transitórios

Mesmo que os sistemas elétricos de potência operem em estado de regime permanente, estes sistemas e seus componentes devem ser projetados no sentido de suportar as diferentes solicitações a que são submetidos em condições transitórias.

Na área de transitórios eletromagnéticos temos uma grande variedade de fenômenos, como descritos anteriormente e que são provocados por variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos. Essas variações súbitas, são promovidas por descargas atmosféricas, faltas nos sistemas, nas operações de energização de transformadores, de banco de capacitores e até mesmo na atuação de dispositivos de proteção .

Assim, uma análise de transitórios através de modelos de simulação, tanto pode levar à especificação dos mais variados equipamentos de um sistema elétrico, quanto favorecer à determinação dos motivos que provocaram uma perturbação no sistema.

Neste capítulo, se faz a apresentação dos modelos utilizados na análise de transitórios, bem como do programa de simulação EMTP/ATP, com suas generalidades, modelos disponíveis e faixas de frequência adotadas ao estudo de cada condição transitória, concluindo com observações a respeito do ATPDraw para o modelamento dos sistemas de transmissão utilizados neste trabalho.

4.1. Modelos para Simulação de Transitórios:

A análise do comportamento dos fenômenos transitórios em sistemas elétricos, pode ser realizada através de modelos analógicos ou digitais, isto é, estes modelos irão refletir a resposta dos sistemas elétricos aos diferentes transitórios.

Os modelos para simulação analógica, que têm sido tradicionalmente empregados na análise de transitórios em redes elétricas, utilizam equivalentes elétricos para a representação dos componentes da rede.

No caso de simuladores digitais, os elementos dos circuitos são modelados por um conjunto de equações que definem as relações entre tensões e correntes. Assim, os mesmos têm alcançado importantes progressos, haja vista a evolução apresentada nas configurações e velocidade de processamento computacional.

Atualmente, podemos afirmar que não existem limitações, para a modelagem de qualquer componente do sistema elétrico em programas digitais. Qualquer equivalente elétrico, ou desenvolvimento teórico, baseado em características elétricas conhecidas, ou possíveis de serem determinadas por ensaios, pode ser representado por um conjunto de instruções e acoplado num programa digital para o cálculo de transitórios. A combinação de facilidades analógicas e digitais pode ser extremamente proveitosa e, em termos mais realísticos, os dois métodos podem ser encarados como complementares em vez de competitivos [2] e [46].

Assim, esta combinação tem sido amplamente utilizada como, por exemplo, em estudos desenvolvidos para o sistema elétrico brasileiro. Onde os casos de análise transitória foram selecionados no programa analógico TNA (*Transient Network Analyser*) e reprocessados no programa digital EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) para a determinação dos valores empregados nas especificações de equipamentos [46].

Em geral os resultados obtidos, apresentam uma precisão suficiente para os estudos de transitórios, tão necessários à especificação dos componentes de sistemas elétricos de potência. Portanto, independente da técnica de simulação a ser adotada, o que se deseja é que esta seja capaz de representar parâmetros distribuídos e concentrados de um sistema, de modo preciso, inclusive com a dependência dos seus valores com a frequência, como também seja capaz de representar o efeito de não-linearidades que são encontradas em transformadores, pára-raios, arcos em contatos de chaves e disjuntores, etc.

O resultado de tudo isso é um compromisso entre os requisitos específicos para o fenômeno em estudo e as simplificações introduzidas na modelagem dos componentes do sistema, como também nos processos de resolução numérica.

Por outro lado, as dificuldades do cálculo de transitórios não se restringem ao método de cálculo somente, pois a necessidade de dados precisos e completos a respeito do sistema, também apresenta os seus problemas, sem contar na experiência dos profissionais responsáveis pelos estudos, que é um fator primordial. Estes são portanto, os principais fatores, que irão afetar sensivelmente a qualidade dos resultados obtidos para um determinado estudo de fenômenos transitórios.

4.2. Programa Digital de Transitórios Eletromagnéticos EMTP/ATP:

4.2.1 Histórico:

O EMTP (Electromagnetic Transients Program) é o programa de transitórios eletromagnéticos da Bonneville Power Administration (BPA), o mesmo foi desenvolvido por Herman W. Dommel na década de 60, em Munique, Alemanha.

O primeira versão do programa, permitia apenas a modelagem de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, resistências, capacitâncias e linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Na década de 70 estabeleceu-se um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP, o que tornou o programa uma ferramenta bastante poderosa para a execução de estudos de fenômenos transitórios. Atualmente existem grupos de usuários do EMTP na Europa, Índia, Japão, Austrália e América-Latina

Divergências ocorridas entre os coordenadores do programa, levaram à criação de uma nova versão do EMTP, esta nova versão é denominada ATP (*Alternative Transients Program*), mas, na realidade, é apenas uma continuação das versões anteriores do programa EMTP.

4.2.2. Generalidades do ATP:

O ATP é a versão mais difundida do EMTP, e dispõe de versões específicas para diversos tipos de computadores e sistemas operacionais. O mesmo faz a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes monofásicas e polifásicas, com diferentes

topologias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. Durante a solução, são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

O programa permite a representação de não-linearidades, de elementos com parâmetros concentrados, de elementos com parâmetros distribuídos (linhas de transmissão), de chaves, de transformadores, de reatores, etc. De uma forma geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e em sequência zero e positiva, dependendo do modelo.

A estrutura do ATP compreende do programa principal e várias rotinas e/ou programas auxiliares, tais como *LINE CONSTANTS* (para cálculo de parâmetros de linhas de transmissão), *CABLE CONSTANTS* (para cálculo de parâmetros de cabos subterrâneos), *MODELS* (ferramenta para simulação de algoritmos genéricos), *TACS* (análise transitória de sistemas de controle), *TPPLOT* (rotina de análise gráfica dos resultados) e *ATPDraw* (editor gráfico e gerenciador). O anexo 3, mostra uma estrutura básica da entrada de dados do ATP [46].

Assim, a modelagem dos sistemas elétricos é feita através de uma composição de modelos analíticos e individuais, que são representados por um conjunto de equações diferenciais e algébricas, solucionadas em intervalos de tempos discretos.

Quanto à definição do intervalo de integração, utilizado para a simulação dos componentes, considera-se que as simulações envolvendo altas frequências requerem passos de integração muito pequenos. No caso dos fenômenos de baixas frequências, são requeridos passos de integração maiores. Assim, em função da frequência máxima ($f_{máx}$), esperada no transitório e na definição de um período com suficiente detalhamento para esta frequência, o intervalo de tempo do passo de integração pode ser estimado pela seguinte equação [2]:

$$\Delta t \leq \frac{1}{10 \cdot f_{máx}} \quad (4.1)$$

Como exemplo, nos estudos de transitórios de manobra ou chaveamento, a faixa do intervalo de tempo de integração está entre 25 e 100 μs , já para os estudos de descargas atmosféricas entre 0,01 e 0,1 μs .

O tempo máximo de simulação, depende do tipo de fenômeno em análise, mas também de alguns resultados obtidos na realização do estudo. Análises de descargas

atmosféricas não necessitam mais do que 20 μ s de simulação, enquanto as análises de energização de linhas de transmissão podem ser realizadas com 50 ms de simulação [2].

4.3. Modelos Disponíveis no ATP:

A seguir são apresentados de forma sucinta, descrições de alguns dos principais modelos disponíveis no ATP, cujas principais referências foram [18] e [46].

4.3.1. Elementos Concentrados:

Utilizados na representação de resistências, de indutâncias e de capacitâncias sem acoplamento entre fases. Estes elementos podem ser conectados em qualquer disposição formando componentes de filtros, de bancos de capacitores, de reatores de linha, de equivalentes de rede, etc.

4.3.2. Elementos R-L Acoplados:

Onde temos os elementos R-L com acoplamento entre fases, para qualquer número de fases. A principal finalidade destes elementos acoplados é a aplicação em equivalentes de rede, sendo inclusive possível a sua utilização diretamente em parâmetros de sequência zero e positiva.

4.3.3. PI - Equivalentes Polifásicos:

Um elemento do tipo PI-equivalente, com acoplamento entre fases, para qualquer número de fases, pode ser representado, tal como mostrado na Figura 4.1 para um circuito trifásico [2] [46].

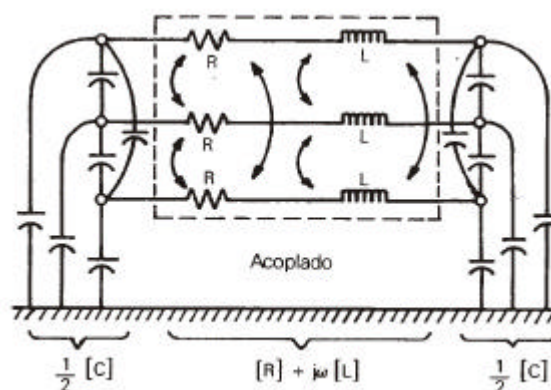


Fig.4.1 – PI Equivalente

A finalidade principal deste elemento está na representação de linhas de transmissão, onde este tipo de modelagem é aceitável.

A conexão série de vários destes equivalentes, que permite ainda a inclusão de outros elementos em série e derivação, é utilizada somente na solução de regime permanente.

4.3.4. Transformadores:

Transformadores monofásicos, com vários enrolamentos, podem ser representados por um circuito equivalente, onde estão presentes as impedâncias equivalentes de dispersão de cada enrolamento, o ramo magnetizante, com saturação e com perdas no núcleo, e a relação de transformação entre enrolamentos.

Para representação de um transformador trifásico, os transformadores monofásicos podem ser utilizados, inclusive respeitando-se as ligações de cada lado.

O programa ATP, dispõe ainda de outras possibilidades para modelagem de transformadores, como a sub-rotina *XFORMER*, que representa um transformador por uma matriz de impedâncias, para obtenção dos parâmetros R e L [46].

4.3.5. Linhas de Transmissão:

Os modelos de linhas de transmissão disponíveis no ATP são bastante flexíveis e atendem às necessidades mais frequentes dos estudos de transitórios. As linhas de transmissão podem ser representadas por uma cadeia de PI's ou por parâmetros distribuídos.

Geralmente, a modelagem das linhas de transmissão é realizada utilizando-se parâmetros distribuídos, com ou sem a variação da frequência. A modelagem que considera a variação da frequência é a mais completa disponível no ATP, mas apresenta simplificações, pois uma solução rigorosa necessitaria de um modelo generalizado de variação de parâmetros com a frequência, baseado em matrizes de transformação modal dependentes da frequência. Mas este fato, introduz uma complexidade não compatível com os métodos computacionais utilizados no ATP.

Assim, se em circuitos perfeitamente transpostos, essa matriz de transformação é real e não dependente da frequência, o mesmo não ocorre para circuitos não-transpostos, onde essa matriz deveria ser complexa e dependente da frequência. Entretanto, para uma

ampla gama de frequências essas matrizes podem ser consideradas praticamente constantes e reais. No ATP, a matriz de transformação é constante e real [18].

O programa permite a modelagem das linhas de transmissão com os parâmetros variando com a frequência, através de duas opções, que são as sub-rotinas *JMARTI* e *SEMLYEN*, as quais utilizam técnicas distintas para alcançar o mesmo objetivo, mas também fazem o uso das características de domínio modal, com uma matriz de transformação constante e real, calculada para uma frequência especificada pelo usuário. Internamente, essas sub-rotinas utilizam a rotina auxiliar *LINE CONSTANTS* para cálculo das matrizes de resistências, indutâncias e capacitâncias, em componentes simétricas ou de fase, para qualquer frequência entre 0,0001 Hz e 500 kHz [18].

4.3.6. Elementos Não-Lineares:

O programa permite a representação de resistências e indutâncias não-lineares, sendo disponíveis diversas alternativas para esta finalidade. As resistências são representadas através de pontos no plano tensão-corrente (V, i), havendo possibilidade de se representarem resistências não-lineares variáveis em função do tempo [46].

As resistências não-lineares representadas em função da corrente (R, i) são utilizadas para representar pára-raios de uma maneira simplificada ou então como complemento para uma modelagem mais complexa utilizando-se a sub-rotina *TACS* para análise transitória de sistemas de controle. Já estas mesmas resistências, mas em função do tempo (R, t), têm aplicação restrita, com aplicações somente para a simulação de impedâncias de aterramento e simulação de arco em disjuntores [46].

As indutâncias não-lineares representadas por pontos no plano fluxo-corrente (f, i) são utilizadas para representar a característica de saturação de transformadores e reatores [2].

4.3.7. Chaves:

Existe uma variedade muito grande de modelos de chaves no programa ATP. Onde podem ser representadas chaves de tempo controlado, chaves estatísticas, chaves sistemáticas, chaves controladas por tensão ou por sinais, bem como chaves de medição, e estas chaves simulam o comportamento de disjuntores e elementos retificadores [46].

As chaves de tempo controlado podem efetuar as operações de fechamento e de abertura em tempos especificados pelo usuário.

As chaves estatísticas têm os tempos de fechamento gerados conforme uma distribuição estatística do tipo normal ou do tipo uniforme, cujos parâmetros (tempo médio e desvio padrão) são definidos pelo usuário. As chaves sistemáticas executam a mesma função, porém com tempos de fechamento gerados de acordo com uma determinada lei de formação.

As chaves controladas por tensão, tem uma determinada sequência de operação especificada pelo usuário, de modo que a chave estando originalmente aberta, feche após um tempo superior a um determinado tempo, desde que a tensão através da chave seja superior ao valor estabelecido pelo usuário. Após o fechamento é decorrido um intervalo de tempo para a abertura dentro da margem de corrente pré-fixada.

As chaves controladas por sinais, são aquelas que recebem sinais provenientes da TACS e cuja função principal se refere à simulação de diodos e tiristores. As chaves de medição são aquelas que se encontram permanentemente fechadas e cuja finalidade é somente a de monitorar corrente, potência ou energia [46].

Para concluir, o programa permite combinações das chaves descritas acima, de diversas formas de modo a atender às necessidades do estudo.

4.3.8. Fontes:

Com uma representação de vários tipos de fontes de excitação, em tensão ou corrente, as quais são definidas analiticamente dentro do programa. É possível a simulação de fontes de excitação com diferentes formas de onda, cuja associação de duas ou mais fontes permite a representação de uma função composta. O usuário tem ainda, a opção de definir suas próprias fontes de excitação, seja ponto a ponto, ou através da sub-rotina TACS ou então através de comandos em FORTRAN [46].

Outra possibilidade é a utilização de fontes do tipo exponencial dupla e de máquinas girantes, sejam elas máquinas síncronas, máquinas de indução ou máquinas de corrente contínua.

4.4. Observações Complementares Referentes ao ATP:

A diversidade de opções de modelagem que o programa ATP oferece, permite a realização de uma extensa gama de estudos de transitórios; e fazem com que o usuário seja

responsável por uma série de decisões, que vão desde a escolha do passo de integração mais adequado até a análise dos resultados obtidos, o que exige certa experiência na obtenção de resultados confiáveis.

Como citado anteriormente, o mesmo código ATP contém diversas rotinas auxiliares de suporte e mesmo programas completos, como é o caso do programa de cálculo de parâmetros de linhas e do programa de análise transitória de sistemas de controle (*TACS*, *MODELS*).

A resposta do sistema elétrico no tempo, é disponível para tensões de barras e de ramos, e para correntes de ramos, através de uma tabela de valores ou de gráficos.

Os estudos estatísticos de transitórios, têm os resultados apresentados sob a forma de distribuições, sendo fornecidos os valores médios e desvios padrão e histogramas das grandezas especificadas. Outro aspecto, é a obtenção da solução em regime permanente, onde são impressos todas as tensões de barras, fluxos de potência e correntes nos ramos da rede em estudo [46]. Portanto, trata-se de uma ferramenta computacional de grande flexibilidade e importância na realização de estudos de transitórios em sistemas de potência, ou mesmo de estudos em regime permanente.

4.5. Faixas de Frequência Associadas aos Transitórios:

O estudo de fenômenos transitórios em sistemas elétricos, envolve uma faixa de frequência que varia de 0 Hz (DC) à aproximadamente 50 MHz. Em alguns casos específicos atingem-se valores maiores.

Os valores acima da frequência industrial (50/60 Hz), envolvem normalmente fenômenos eletromagnéticos, e esta é nossa faixa de interesse; enquanto valores abaixo da frequência industrial envolvem fenômenos do tipo eletromecânicos, comuns em máquinas rotativas. A Figura 4.2 , mostra uma distribuição dos vários fenômenos transitórios e suas faixas de frequência mais comumente associadas [2].

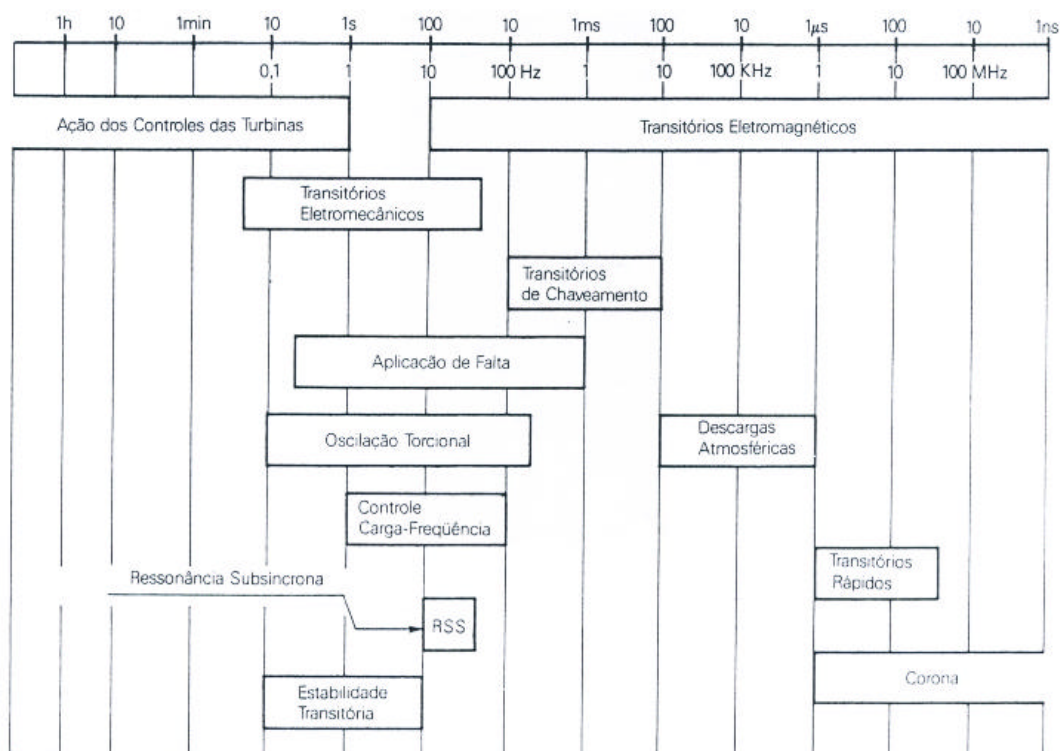


Fig. 4.2 – Faixas de Frequência associada aos Transitórios em Sistemas Elétricos.

4.6. Simulação de Componentes do Sistema Elétrico:

A simulação de todos os componentes de um sistema elétrico, na faixa de frequência de 0 a 50 MHz, é algo praticamente difícil de realizar. Por esta razão, as características físicas de um específico elemento do sistema, que tenha um efeito decisivo no fenômeno transitório de interesse, devem ser modeladas de forma detalhada.

Assim, na análise do chaveamento de uma linha, o principal interesse está concentrado na sobretensão máxima que pode ocorrer, então as características da linha e do sistema que a alimenta são muito importantes; contudo, se é de interesse obter detalhes da taxa inicial de crescimento das sobretensões, as características detalhadas da subestação devem ser representadas, entre elas o número de saída de linhas e as respectivas impedâncias de surto. Estes aspectos são importantes no fenômeno de ondas viajantes e na determinação da forma inicial da sobretensão [2].

Agora, quando estamos estudando fenômenos com frequências acima de 1 MHz, tais como transitórios rápidos em subestações isoladas a SF₆, não somente os fenômenos de ondas viajantes em seções de barramento são importantes, mas também pequenas

capacitâncias e indutâncias dos transformadores de medição, e o efeito capacitivo de isoladores internos e curvaturas.

Assim, a representação para simulação dos componentes individuais do sistema elétrico, devem portanto, corresponder à faixa de frequência específica do fenômeno transitório em particular. Por esta razão, o espectro de frequência é classificado em 4 grupos, conforme é apresentado na tabela 4.1[47]:

Grupos	Faixa de Frequência	Representação
I	0 Hz – 100 Hz	Mudança de carga e fenômenos devido à saturação
II	100 Hz – 10 kHz	Transitórios devido a chaveamentos
III	10 kHz – 1 MHz	Transitórios devido a descargas atmosféricas
IV	1 MHz – 50 MHz	Transitórios rápidos devido a reinições na manobra

Tabela 4.1 – Classificação das Faixas de Frequência.

O anexo 4, mostra a representação individual dos componentes do sistema, segundo estas faixas de frequência. Assim, na simulação do fenômeno transitório a ser estudado, dentro destas diferentes faixas de frequências, os componentes do sistema podem ser representados por uma combinação adequada destes modelos, que foram inicialmente sugeridos pelo *Working Group 33.02* do CIGRÉ [47].

4.7. Modelagem dos Sistemas utilizando o ATPDraw:

O desenvolvimento deste trabalho partiu inicialmente da modelagem e simulação do sistema de transmissão escocês, o *Scottish Power* em 400 kV e do sistema brasileiro da Eletrosul em 525 kV, utilizando o ATPDraw [21].

Trata-se de um programa de suporte ao EMTP-ATP, que consiste de um pré-processador gráfico para gerar arquivos de entrada de dados para o ATP, criando e editando modelos de redes elétricas para serem simulados interativamente. No programa, o usuário pode construir desde um pequeno circuito elétrico até sistemas mais complexos, pela simples seleção de componentes pré-definidos, como mostra a figura 4.3 [21], ou até mesmo criar seus próprios componentes ou *models*, assim o pré-processador irá gerar automaticamente um arquivo de entrada para o ATP no formato correto.

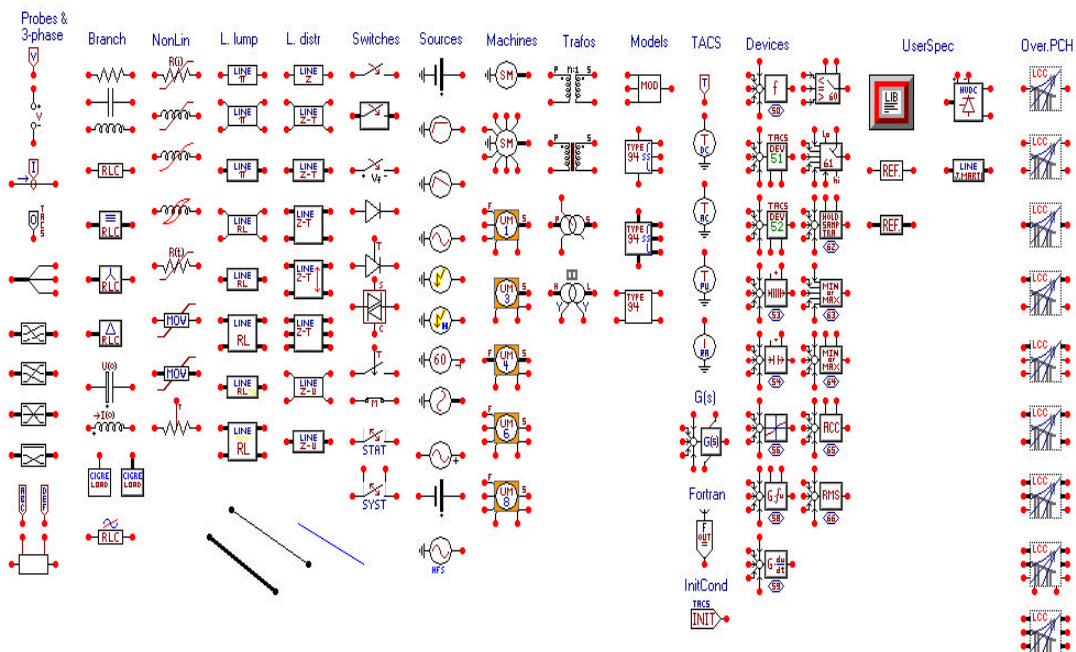


Fig.4.3. Componentes pré-definidos no ATPDraw.

Para modelagem dos sistemas de transmissão utilizou-se como componentes pré-definidos, fontes CA de tensão e equivalentes RLC para representar as subestações, blocos LCC - *Line Cables Constants* para representar as linhas de transmissão, chaves de tempo controlado para a representação de disjuntores e simulação de curto-circuitos, além de medidores de corrente e tensão.

A figura 4.4 mostra um conjunto de componentes, utilizados na representação de uma subestação de EAT- Extra Alta Tensão, onde os principais dados de entrada são a amplitude de tensão da fonte trifásica (módulo e ângulo de fase), obtidos através do resultado de um fluxo de potência do sistema em estudo, a frequência do sistema e os valores dos equivalentes RLC , obtidos segundo a disposição dos barramentos na subestação e a capacidade de curto-circuito da mesma. A figura 4.5 mostra um exemplo da entrada de dados para a fonte e para um bloco RLC [21].

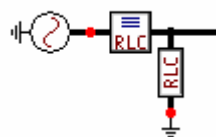


Fig.4.4. Representação da subestação de EAT.

The image shows two side-by-side software windows for configuring electrical components.

Component: AC3PH

DATA	VALUE
U/I	0
Amp.	326560
f	50
pha	55
A1	0
Tstart	-1
Tstop	1

Group No: 0
Comment:

Component: RLC3

DATA	VALUE
R_1	0
L_1	50
C_1	9999.9
R_2	0
L_2	50
C_2	9999.9
R_3	0
L_3	50

NODE	PHASE	NAME
IN1	3	
OUT1	3	

Group No: 0 Label:
Comment:
Output:
 Current Voltage Curr&Volt Power&Energy Hide Lock \$Vintage.1

Buttons: OK, Cancel, Help

Fig.4.5. Entrada de dados para um fonte CA e um equivalente *RLC*.

Para a representação das linhas de transmissão, foram utilizados blocos *LCC*, figura 4.6, que na realidade são sub-rotinas do ATP, para o cálculo de parâmetros das linhas de transmissão. Na figura 4.7, um exemplo das definições que o usuário deve efetuar, tais como, o comprimento da linha, a transposição ou não da mesma e a forma de cálculo dos parâmetros distribuídos variando com a frequência, utilizando os modelos *JMARTI* ou *SEMLYEN* citados anteriormente. No anexo 5, são apresentados os comprimentos das linhas de transmissão dos dois sistemas teste utilizados.

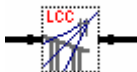


Fig. 4.6. Bloco *LCC* para linhas de transmissão.

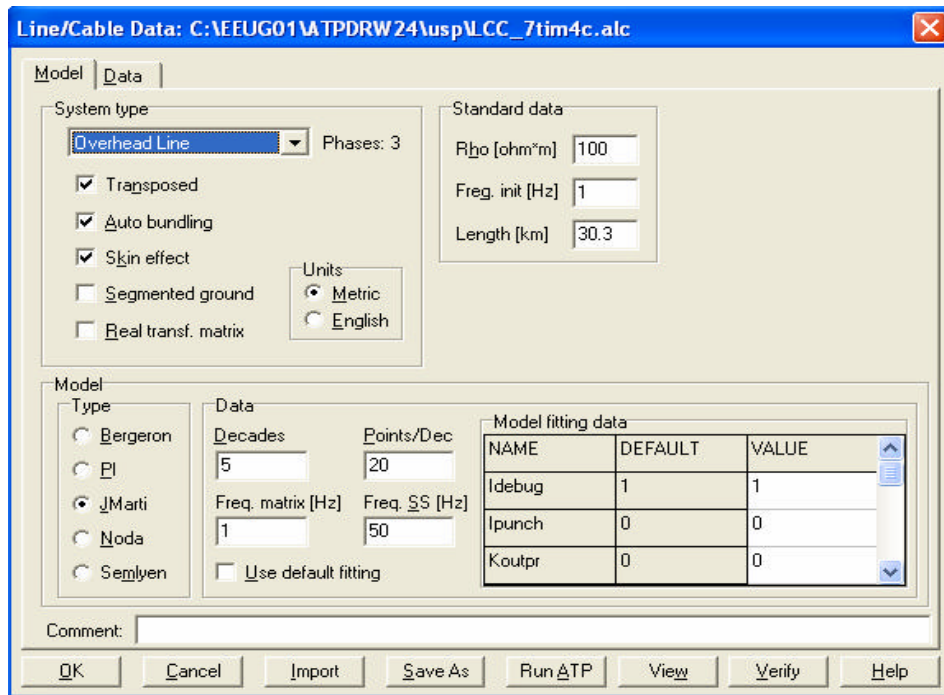


Fig. 4.7. Definição do comprimento da linha de transmissão e as considerações para o cálculo de parâmetros utilizando o bloco *LCC*.

Para encerrar implementação deste bloco, é necessário a definição dos dados relacionados à configuração física da linha de transmissão, definir o número de condutores e distâncias envolvidas, como mostra a figura 4.8.

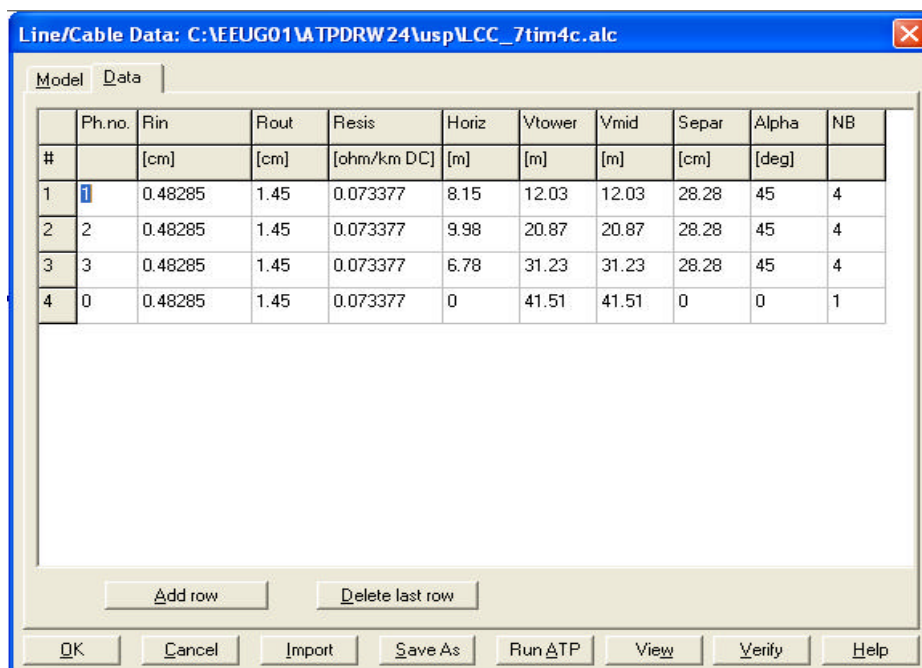


Fig.4.8. Configuração da linha de transmissão no bloco *LCC*.

Para se efetuar a simulação de curto-circuitos, precisamos reunir na modelagem, dois blocos *LCC* para a mesma linha de transmissão e também chaves de tempo controlado, com operação independente entre as fases para representar os disjuntores nos terminais da linha. O curto-circuito, se dá através da utilização de uma outra chave de tempo controlado, acoplada entre esse conjunto e um resistor, representando a resistência de falta. A figura 4.9, mostra a reunião desses componentes para um curto-circuito monofásico terra. Na figura 4.10, um exemplo de entrada de dados para definição dos tempos de abertura e fechamento nas chaves utilizadas.

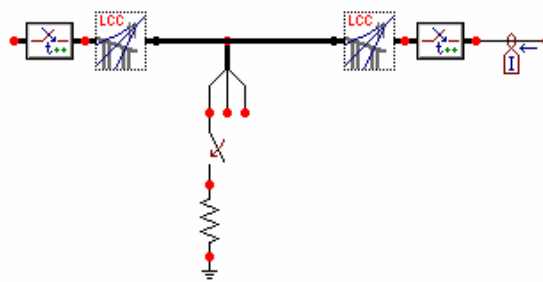


Fig.4.9. Representação de um curto-circuito monofásico terra no ATPDraw.

DATA	VALUE
T-cl_1	1
T-op_1	0.075
T-cl_2	-1
T-op_2	1
T-cl_3	-1
T-op_3	1
Imar	0

DATA	VALUE
T-cl	0.01666
T-op	0.019
Imar	10

NODE	PHASE	NAME
SWF	1	
SWT	1	

Fig.4.10. Entrada de dados para as chaves de tempo controlado.

Feita, as observações a respeito da modelagem no ATPDraw dos principais elementos que compõem um sistema de transmissão, concluímos essa seção, com as figuras 4.11 e 4.12, onde são apresentados os sistemas modelados e que foram utilizados nesse trabalho, com suas principais linhas de transmissão.

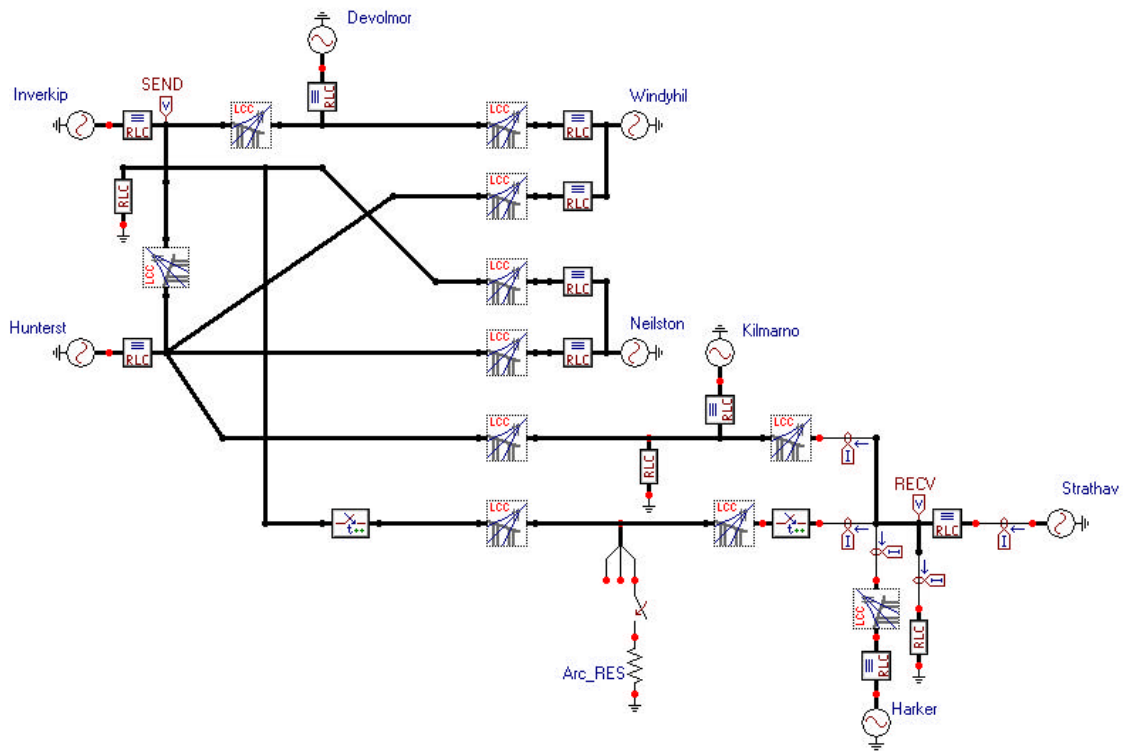


Fig.4.11. Sistema Scottish 400 kV, modelado no ATPDraw.

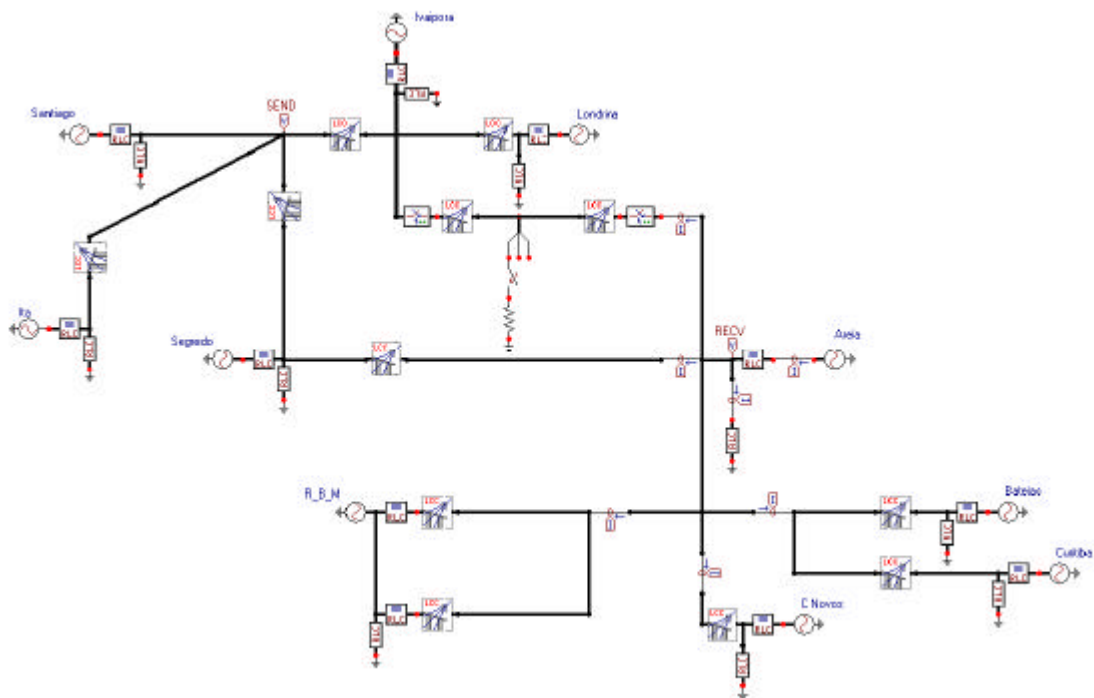


Fig.4.12. Sistema Eletrosul 525 kV, modelado no ATPDraw.

4.8. Considerações Finais:

Neste capítulo foram apresentadas as principais considerações a respeito do programa EMTP/ATP, que é capaz de realizar a simulação e análise de transitórios eletromagnéticos, seja em redes monofásicas ou polifásicas, com diferentes topologias, permitindo a representação de não-linearidades e de elementos com parâmetros concentrados e distribuídos.

Considerado como padrão entre os seus programas similares, o ATP possui todos os recursos existentes em modernos simuladores, por isso é uma ferramenta essencial para realização de estudos de engenharia de sistemas, de análise de curto-circuitos, de análise de sobretensões, de análise de contingências, de análise de falhas em equipamentos e estudos para o estabelecimento de medidas corretivas, entre outros.

A documentação do programa consiste basicamente de um manual, o *ATP Rule Book* [18], onde estão contidas todas as informações sobre os modelos disponíveis. Porém, muitas publicações tem sido feitas no sentido de complementar essa documentação, tais como o *ATP Theory Book* e o *ATPDraw-User Manual* [21], que destacam a metodologia utilizada no desenvolvimento de cada modelo do ATP e a forma como editar e gerenciar esses modelos para a simulação de circuitos e sistemas.

Feita estas considerações, foram apresentados neste documento alguns dos modelos disponíveis no ATP, as faixas de frequência mais comuns associadas aos estudos de transitórios em sistemas de energia, como também observações de forma a representar os componentes do sistema, segundo uma faixa de frequência específica.

A última seção deste capítulo, tratou da modelagem dos sistemas de transmissão utilizados em nosso trabalho. Com o programa *ATPDraw*, geramos os arquivos de entrada de dados para a simulação no ATP, utilizando os componentes pré-definidos neste editor e os dados da configuração física e de estudos de fluxo de potência, tanto no sistema escocês, como no sistema brasileiro.

Os resultados da simulação nestes sistemas, presentes em arquivos no formato '.pl4', irão compor a estrutura do programa de pós-processamento de sinais, desenvolvido para o estudo e aplicação da teoria de ondas viajantes e de estimação de transitórios apresentadas no capítulo 3.

No capítulo a seguir, será apresentada a ferramenta computacional desenvolvida em ambiente Matlab, que serviu para análise de transitórios simulados no ATP, com vistas à

localização de faltas em sistemas de transmissão, e que constitui o principal objetivo de nossa pesquisa.

Capítulo 5

O Software para Análise de Transitórios de Ondas Viajantes e a Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão

A análise e interpretação de transitórios de alta frequência gerados por faltas em sistemas de transmissão, podem favorecer a identificação dos fatores que afetam a precisão dos algoritmos de localização de faltas, bem como o desenvolvimento de novas técnicas de releamento, devido principalmente aos recentes avanços na tecnologia de processamento de sinais.

Neste capítulo, será apresentado o programa, que foi desenvolvido em ambiente MatlabTM [22], no qual implementamos a teoria de ondas viajantes, com vistas à localização de faltas em sistemas de transmissão, nossa principal contribuição neste trabalho.

A utilização dessa nova ferramenta, pode beneficiar a análise comparativa dos transitórios de alta frequência, observados nos secundários de transformadores de corrente, e que são montados em esquemas de medição e proteção de linhas de transmissão.

Assim, com as informações extraídas de correntes e tensões secundárias, teremos condições não somente de determinar as fases envolvidas na falta, como também, utilizar os valores incrementais dos sinais de corrente e tensão, para determinar a sua localização [49]. Outro ponto a destacar também, seria a possibilidade de avaliação dos transitórios de alta frequência em subestações de EAT, como foi apresentado em [48].

Para este fim, utilizamos um filtro que foi modelado, para extrairmos as componentes de alta frequência, pois o mesmo, pode ser acoplado como um transdutor de ondas viajantes ao secundário desses transformadores de medição, constituindo uma das principais rotinas do programa.

É apresentado ainda neste capítulo, uma visão geral do programa e seus comandos, dentre eles, o que é responsável pela estimação de tensão transitória em função da corrente, e também o comando que inclui a técnica de *Correlação-Cruzada* ou *Cross-Correlation*, utilizada para a detecção de ondas incidentes. Sendo que esta técnica, foi a principal ferramenta matemática, aplicada na rotina destinada a localização de faltas nos sistemas de transmissão.

5.1. A Apresentação do Programa FLATP:

A necessidade do desenvolvimento de uma ferramenta prática, no sentido de atender a nossa proposta, que é uma contribuição ao estudo da proteção de sistemas elétricos, voltada à localização de faltas, surgiu após longas avaliações, simulações e estudos feitos com o programa de análise de transitórios EMTP-ATP e seu editor gráfico ATPDraw, já descritos no capítulo anterior, e que tem sido ao longo dos últimos anos, objeto de estudo e utilizados por muitos pesquisadores na área de sistemas de potência.

Desta forma, desenvolvemos a partir dos arquivos de saída de simulação **.PL4** do ATP, um programa que constitui uma interface gráfica, que utiliza esses arquivos, num tratamento de sinais de corrente e tensão simulados, mas que é perfeitamente compatível à conexão de dados reais dos sistemas a serem monitorados. Assim, esse programa pode ser utilizado para interpretação e comparação dos transitórios de ondas viajantes, observados e simulados nos esquemas de proteção, além de fornecer opções como a obtenção de valores incrementais, a análise modal e a análise da correlação-cruzada de ondas viajantes, com vistas à localização de faltas num sistema de transmissão, demonstrando uma praticidade e uma precisão de resultados satisfatórios.

O **FLATP- Fault Locator Using The ATP**, ver anexo 6, foi desenvolvido durante o estágio de doutoramento, realizado na Universidade de Nottingham, Inglaterra, por essa razão, todos os comandos e ações de processamento estão na língua inglesa, mas uma nova versão em português está sendo preparada. Esse programa tem sua definição, voltada ao principal objetivo do nosso trabalho, que é justamente a localização de faltas,

aliando a este, um programa de análise de transitórios como o ATP, cuja saída gráfica tem suas limitações.

O programa, foi todo ele desenvolvido num ambiente Matlab, que reúne vantagens como uma linguagem de programação técnica de fácil utilização, devido principalmente as várias funções pré-definidas e possuir uma plataforma independente, podendo ser utilizada em diferentes sistemas computacionais.

A figura 5.1, apresenta a principal janela gráfica do FLATP, mostrando algumas opções, como a seleção de arquivos ‘.pl4’ simulados no ATP a serem processados de acordo com o que o usuário definir, e todas as funções que compõem o programa. Uma grande vantagem, é a interação do programa com o usuário, pois em cada etapa, o usuário é questionado e informado o que cada ação produz, ficando a seu critério a escolha ou não de determinada ação.

A figura 5.2, mostra mais uma janela com a opção de seleção de saídas, sejam elas, sinais de tensão ou corrente, como também o diagrama de blocos com a função de transferência utilizada para representar o filtro, que será modelado em seguida.

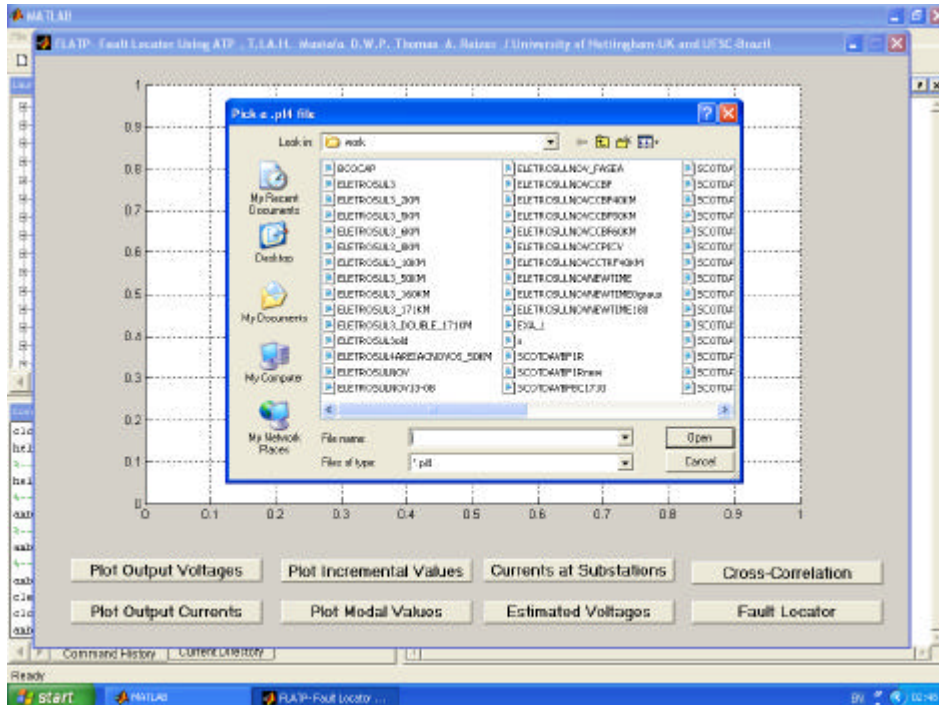


Fig. 5.1. O FLATP, com a opção de escolha de arquivos ‘.pl4’.

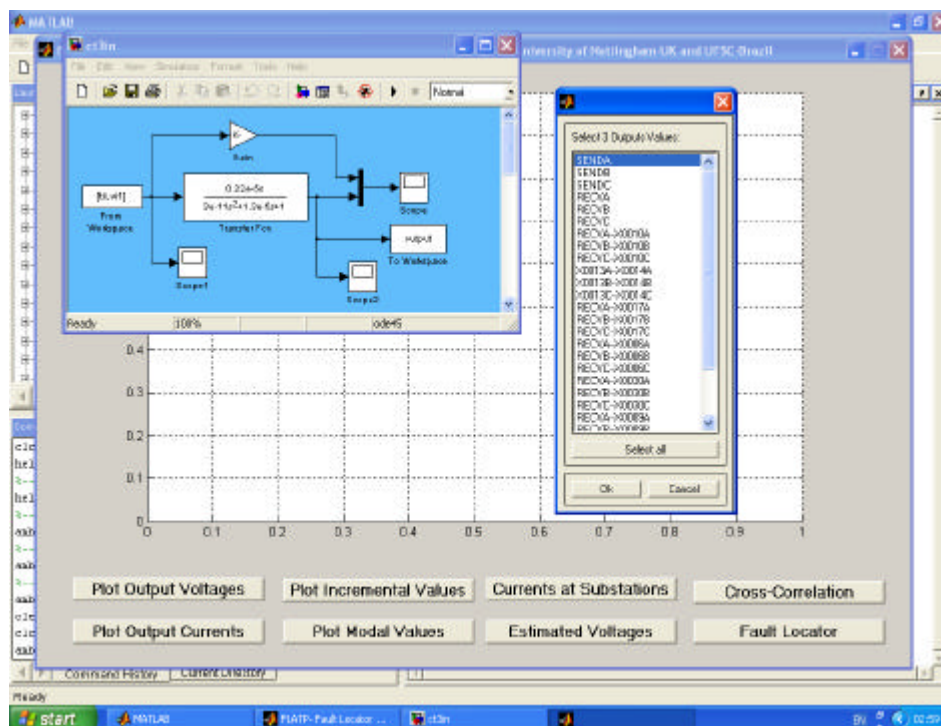


Fig. 5.2. A seleção de sinais de corrente e tensão e a função de transferência do filtro.

5.2. Modelagem do Filtro para Altas Frequências:

Para a obtenção dos sinais de alta frequência, tanto de tensão ou de corrente gerados por faltas, e por conseguinte sua utilização no pós-processamento que é realizado no programa FLATP, houve a necessidade de se efetuar a modelagem de um filtro, representando um transdutor.

A figura 5.3, apresenta a configuração de um transdutor de corrente, montado no secundário de um esquema de medição e proteção de subestações de 400 kV do sistema escocês *Scottish Power* [48], [49] e [50].

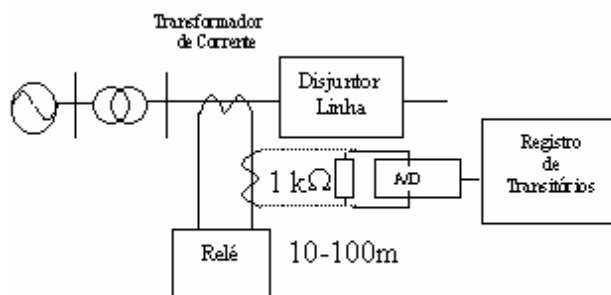


Fig. 5.3. Esquema de proteção e medição.

O esquema anterior pode ser representado, pelo circuito equivalente na figura 5.4, onde V_{in} e I_{in} correspondem respectivamente à tensão e à corrente no secundário do transformador de corrente, e V_{out} e I_{out} correspondem a tensão e a corrente de saída do transdutor, medidas em uma carga de 1 kohm, que é conectada ao transdutor via um cabo trançado de 10 a 100m nas subestações de 400 kV do *Scottish Power* [50].

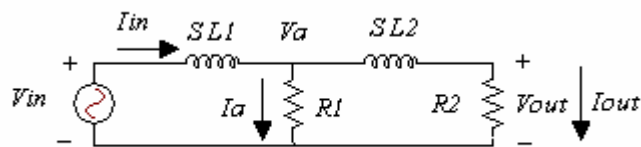


Fig.5.4. Circuito Equivalente do Transdutor de Corrente.

A partir desse circuito equivalente, definimos a função de transferência que relaciona a entrada e saída no transdutor, tanto para sinais de tensão como de corrente. Apresentamos a seguir, o conjunto de equações que modelam esse filtro e que foram utilizadas para implementar a função de transferência da figura 5.2.

Primeiramente as equações que definem as correntes na duas malhas:

$$I_{in} = I_a + I_{out} \quad (5.1)$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_2} \quad (5.2)$$

$$I_a = \frac{V_a}{R_1} \quad (5.3)$$

Em seguida a relação entre a tensão de entrada V_{in} e a tensão V_a no nó específico:

$$V_a = \frac{R_1 // (sL_2 + R_2)}{(R_1 // (sL_2 + R_2)) + sL_1} \cdot V_{in} \quad (5.4)$$

onde,

$$R_1 // (sL_2 + R_2) = \frac{R_1 \cdot (sL_2 + R_2)}{R_1 + (sL_2 + R_2)} \quad (5.5)$$

Substituindo a equação (5.5) na equação (5.4), temos:

$$V_a = \frac{R_1 \cdot (sL_2 + R_2)}{(R_1 + R_2) + (R_1L_1 + R_1L_2 + R_2L_1) \cdot s + (L_1 \cdot L_2) \cdot s^2} \cdot V_{in} \quad (5.6)$$

Considerando que,

$$V_{out} = \frac{R_2}{(sL_2 + R_2)} \cdot V_a \quad (5.7)$$

E substituindo a equação (5.6) na equação (5.7), obtemos a relação entre a tensão de saída e de entrada do filtro, através da seguinte expressão:

$$V_{out} = \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2) + (R_1L_1 + R_1L_2 + R_2L_1) \cdot s + (L_1 \cdot L_2) \cdot s^2} \cdot V_{in} \quad (5.8)$$

Para determinarmos a relação entre a corrente de saída e corrente de entrada, teremos que substituir a equação (5.2) na equação (5.8) e aplicar a relação entre tensão e corrente ($V_{in} = dI_{in}/dt$) na entrada do filtro, obtendo:

$$I_{out} = \frac{R_1 \cdot s}{(R_1 + R_2) + (R_1L_1 + R_1L_2 + R_2L_1) \cdot s + (L_1 \cdot L_2) \cdot s^2} \cdot I_{in} \quad (5.9)$$

onde os parâmetros de resistência e indutância irão depender da relação de espiras do transformador de corrente e do comprimento do cabo trançado, como indicado na figura 5.3.

Portanto nesta seção, foi modelado e implementado o filtro que pode ser utilizado tanto para os sinais de corrente como para os sinais de tensão. A figura 5.5, mostra as janelas com esse filtro, num diagrama de blocos produzido no *simulink*, uma das tantas ferramentas do MatlabTM [22] e também uma saída exemplificada desse filtro.

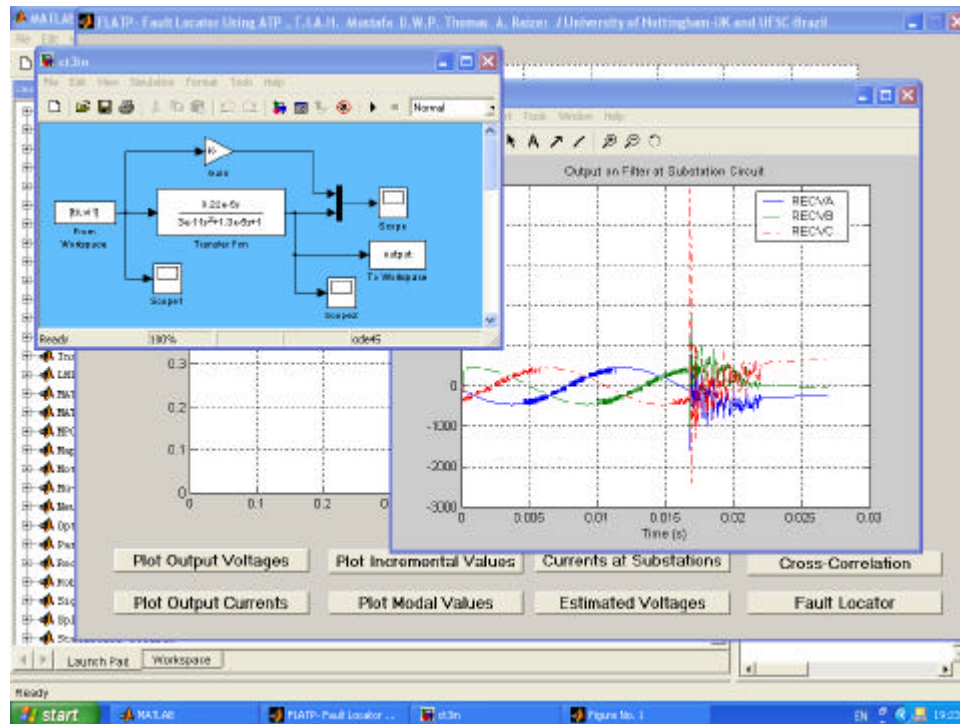


Fig.5.5. Janelas do programa, mostrando o diagrama de blocos e uma saída no filtro.

5.3. Os Comandos do FLATP:

O programa FLATP, possui 8 comandos de ações, que vão desde a simples plotagem dos sinais escolhidos de tensão ou corrente, como também a plotagem de valores incrementais destes sinais; o cálculo e a plotagem de valores modais; a plotagem das correntes de fase e modais das linhas conectadas nas subestações; o cálculo e a plotagem de tensões transitórias estimadas em função das correntes; a aplicação da teoria de correlação-cruzada e concluindo, o comando principal que encaminha a análise completa destes sinais, para o processo de localização de faltas, utilizando valores simulados ou estimados.

5.3.1. Plot Output Voltages:

Plota os sinais de tensão do arquivo '.pl4', escolhido pelo usuário, conforme mostra a figura 5.6 e seguindo os moldes da rotina de análise gráfica *TPPLOT* do programa EMTP/ATP.

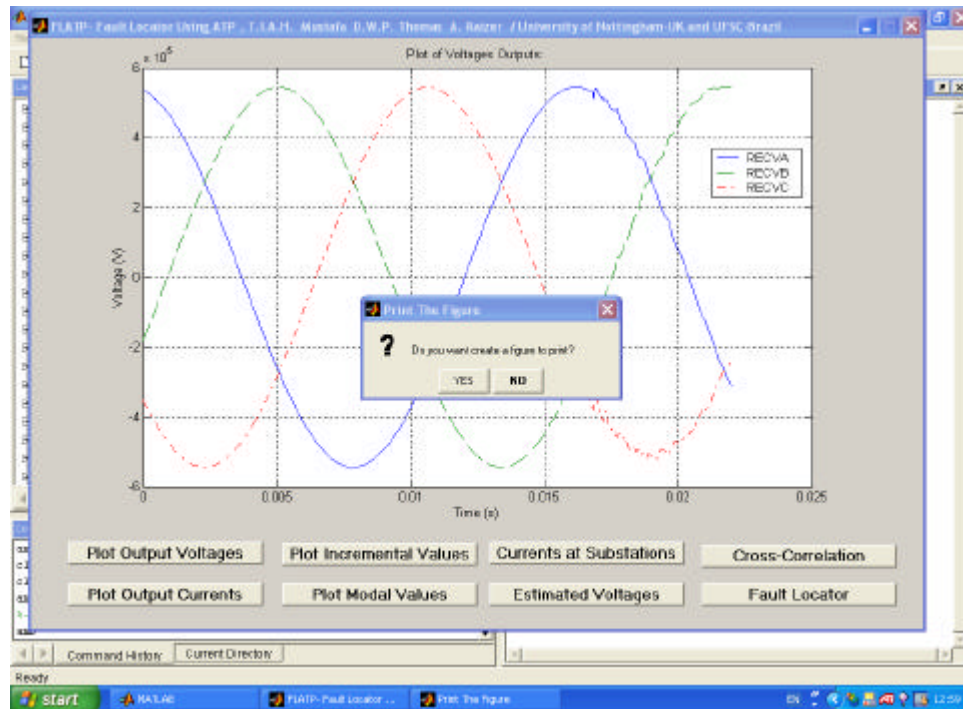


Fig.5.6. Plotagem dos sinais de tensão.

5.3.2. Plot Output Currents:

Este comando, como o anterior, plota agora os sinais de corrente do arquivo 'pl4' escolhido pelo usuário, conforme mostra a figura 5.7.

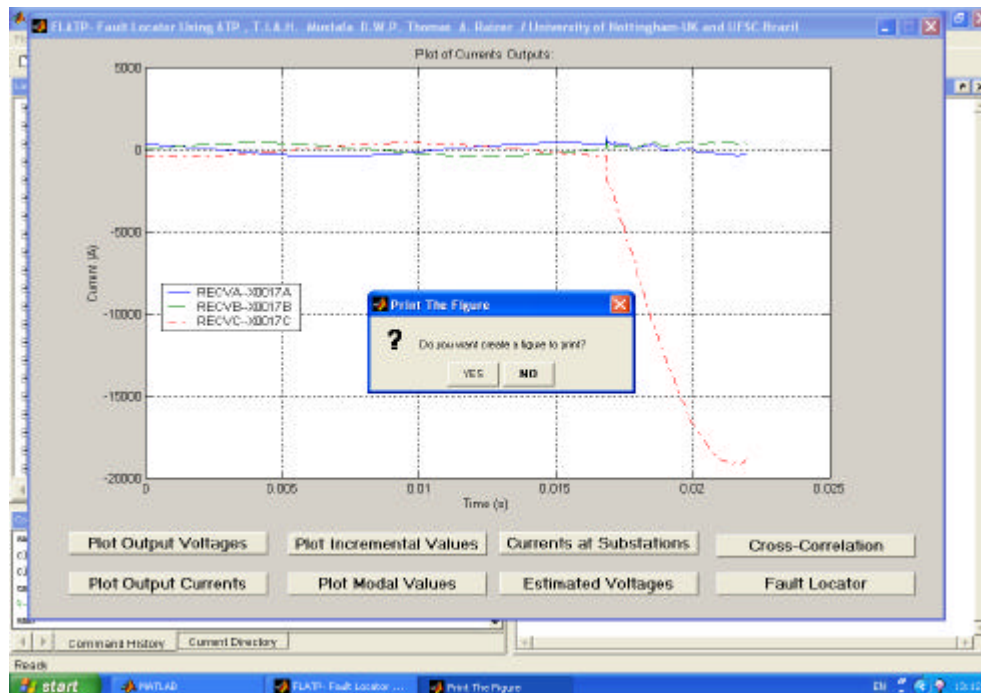


Fig.5.7. Plotagem dos sinais de corrente.

5.3.3. Plot Incremental Values:

Esse comando, após o usuário escolher o arquivo a ser analisado, pede que o mesmo defina qual a frequência do sistema, seja ela 50 ou 60 Hz, a partir daí, os resultados obtidos serão os valores incrementais de tensão ou corrente nos transdutores, medidos pós-falta ou simulados, sendo subtraídos os valores de pré-falta senoidais em regime permanente, conforme foi relatado na seção 3.3 do capítulo 3, que trata das ondas viajantes em linhas de transmissão.

A figura 5.8, mostra um resultado de valores incrementais de tensão de um sistema teste.

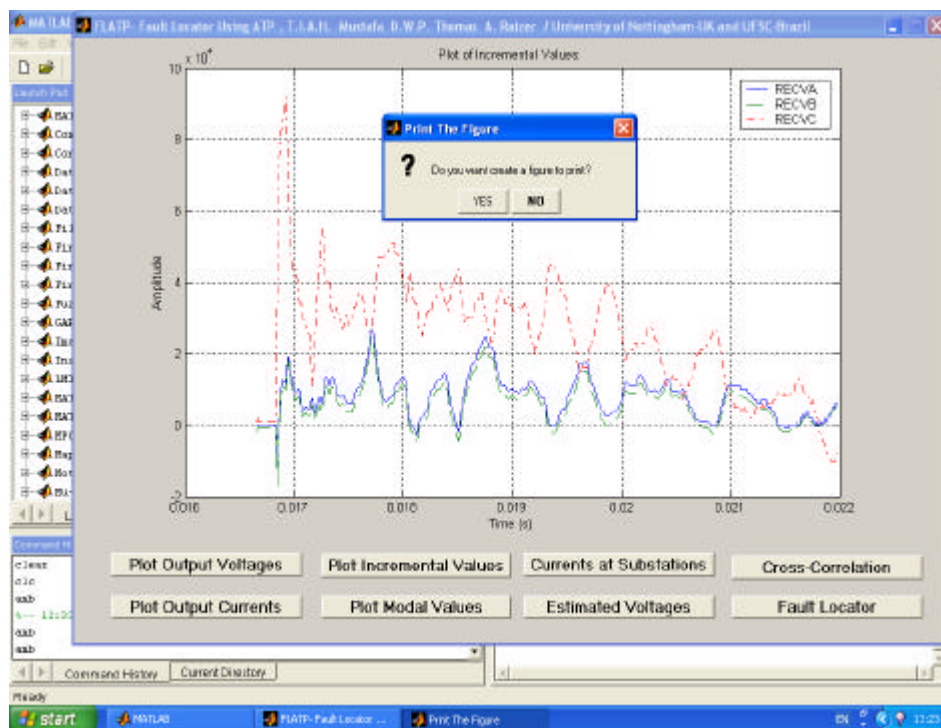


Fig. 5.8. Valores incrementais de tensão.

5.3.4. Plot Modal Values:

Esse comando calcula e plota os valores modais, que são as quantidades transformadas dos valores de fase, utilizando-se uma matriz de transformação modal $[S]$. Assim, conforme foi exposto na seção 3.5.2 do capítulo 3, os transitórios de ondas viajantes propagam-se como modos independentes nos sistemas de transmissão, sendo comum fazer a aproximação de que as três fases são perfeitamente balanceadas; e que as linhas de transmissão são perfeitamente transpostas, de forma que as capacitâncias e

indutâncias mútuas sejam as mesmas. Assim, as matrizes de transformação de corrente e tensão utilizadas nessa rotina são idênticas ($[S] = [Q]$) e definidas pela equação (3.72), sendo utilizadas também em [34], [35], [45] e [51].

A figura 5.9, mostra a saída gráfica dos valores modais de corrente de um arquivo exemplo, obtidos através da matriz de transformação modal.

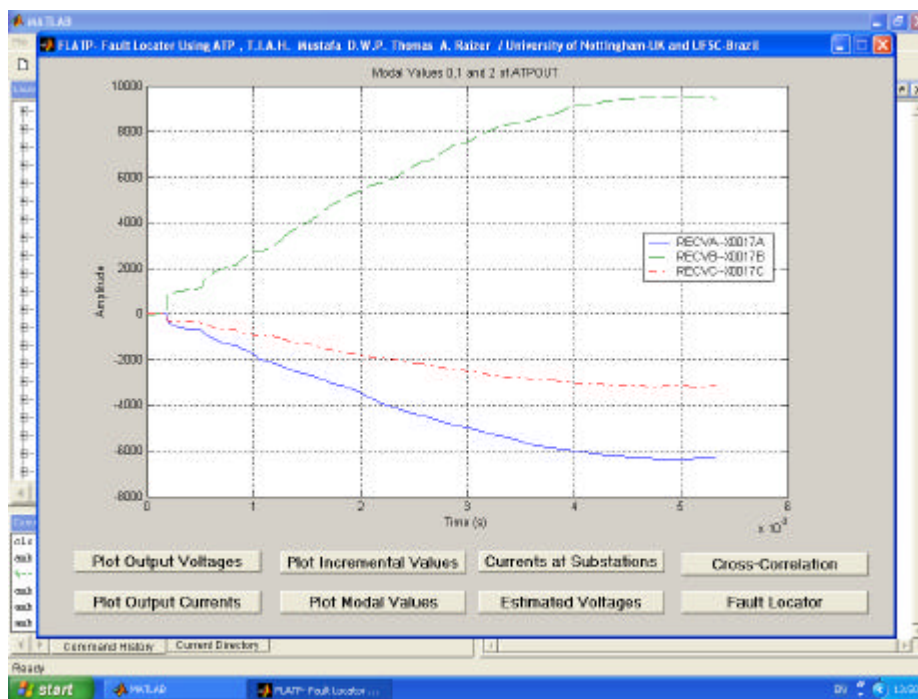


Fig.5.9. Valores modais de corrente.

5.3.5. Currents at Substations:

Quando o usuário utiliza-se desse comando, ele terá a facilidade de análise das correntes nas subestações. Após a escolha do arquivo, que contém os sinais de correntes que foram simulados, fica a cargo do usuário definir o número de linhas conectadas à subestação, e como ele deseja que esses sinais sejam dispostos, quer em valores de fase ou valores modais.

A figura 5.10, apresenta o resultado dessa opção de comando, mostrando os valores modais de 3 linhas conectadas ao barramento de uma subestação. Na mesma figura é possível visualizar a solicitação que o programa faz para o ajuste do número de linhas, onde o padrão definido foi de até 4 linhas por subestação.

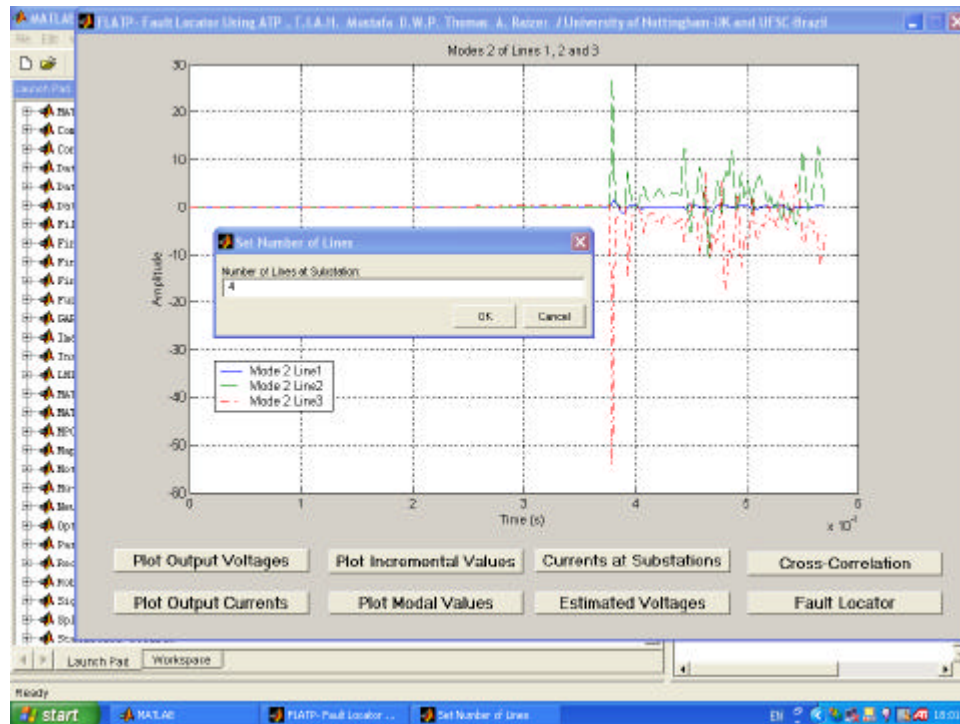


Fig.5.10. Ajustes do número de linhas conectadas a subestação e os valores modais de cada linha.

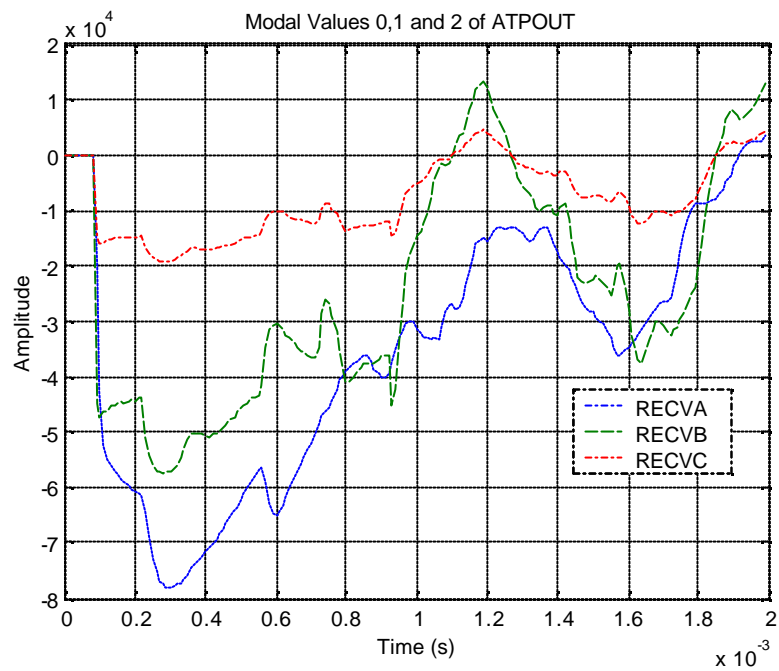
5.3.6. Estimated Voltages:

Com base na metodologia de estimação de transitórios [16], que foi apresentada anteriormente, elaborou-se o comando *Estimated Voltages* ou Tensões Estimadas.

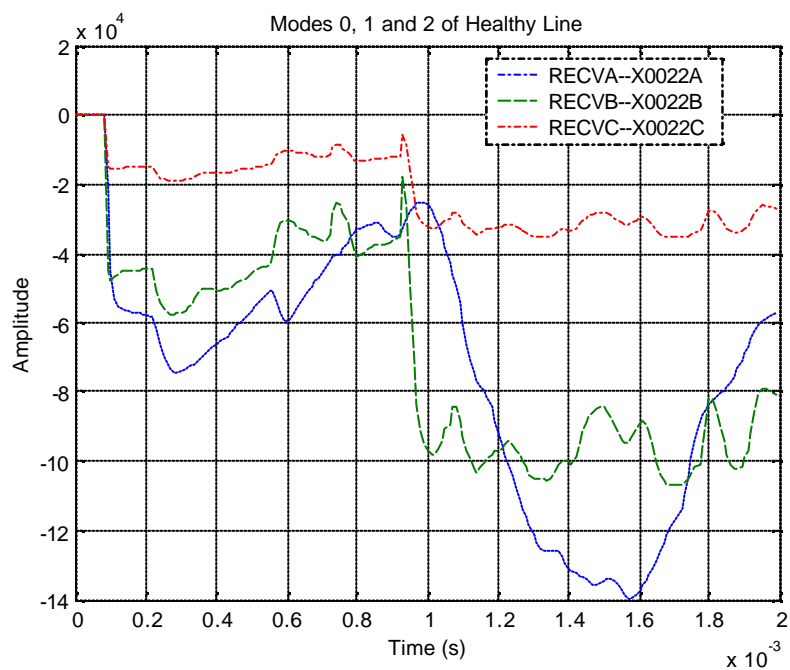
Trata-se de uma rotina, que estima a tensão transitória para um curto intervalo de tempo, a partir da equação (3.70), apresentada no capítulo 3, e utiliza as correntes nas linhas saudáveis, isto é, exceto na que ocorreu a falta.

Assim, através da definição da matriz de impedância de surto modal $[Z_m]$, que é uma matriz diagonal, obtida através da equação (3.55), segundo a modelagem específica de cada linha de transmissão, e juntamente com a matriz vetor de correntes modais, obtida através da transformação modal que o usuário executa, quando este faz a escolha das correntes de fase na linha saudável; esta rotina ou comando terá condições de estimar e plotar as tensões transitórias em função das correntes.

A figura 5.11, mostra os resultados obtidos em um exemplo, com a rotina de estimação de transitórios de tensão a partir de sinais de corrente e a tensão propriamente obtida na simulação. Pode-se observar, que de 0 a 0,8 ms a estimação está correta, mas após 0,8ms, a linha de transmissão conterà mais de um transitório de onda viajante, devido a reflexões em terminações remotas.



(a)



(b)

Fig.5.11. (a) Tensões modais e (b) Tensões modais estimadas.

5.3.7. Cross-Correlation:

Para se fazer a análise na detecção de ondas incidentes no ponto de releamento, elaboramos uma rotina, que utiliza a teoria da *Cross-Correlation* ou Correlação-Cruzada [33].

Essa teoria é definida como o grau de similaridade entre duas funções x e y dependentes do tempo, que podem ser expressas por uma função de covariância [52]:

$$f(\mathbf{u}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{x}][y(t + \mathbf{u}) - \bar{y}] dt \quad (5.10)$$

onde os valores médios x e y são dados por:

$$\bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (5.11)$$

$$\bar{y} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t + \mathbf{u}) dt \quad (5.12)$$

O tempo de atraso \mathbf{u} e a amplitude de um pico na função de covariância, fornece o tempo relativo de deslocamento das funções x e y e as características da relação linear.

Uma melhor avaliação da aplicação dessa ferramenta matemática, pode ser realizada com o auxílio de um diagrama de treliças indicando as ondas viajantes incidentes e refletidas num barramento de referência, como mostra a figura 5.12.

Considerando, que após a chegada da primeira onda incidente denominada de V_{i1} , as outras ondas incidentes subsequentes de interesse V_{i2} e V_{i2t} , possam ser consideradas linearmente dependentes à primeira onda refletida V_{r1} no ponto de releamento. Quando aplicamos a função de covariância, simplesmente extraímos a amplitude e os tempos de chegada das ondas incidentes V_{i2} e V_{i2t} , pela correlação-cruzada da primeira onda refletida V_{r1} com todas as ondas incidentes subsequentes. Portanto, se a onda refletida V_{r1} é correlacionada com as ondas incidentes V_i , o pico na função de correlação-cruzada deve indicar o tempo de chegada da segunda onda incidente V_{i2} .

Assim, as funções x e y dependentes do tempo na equação 5.10, podem ser reescritas da seguinte forma:

$$x = Vr1(t) \quad (5.13)$$

$$y = Vi(t) \quad (5.14)$$

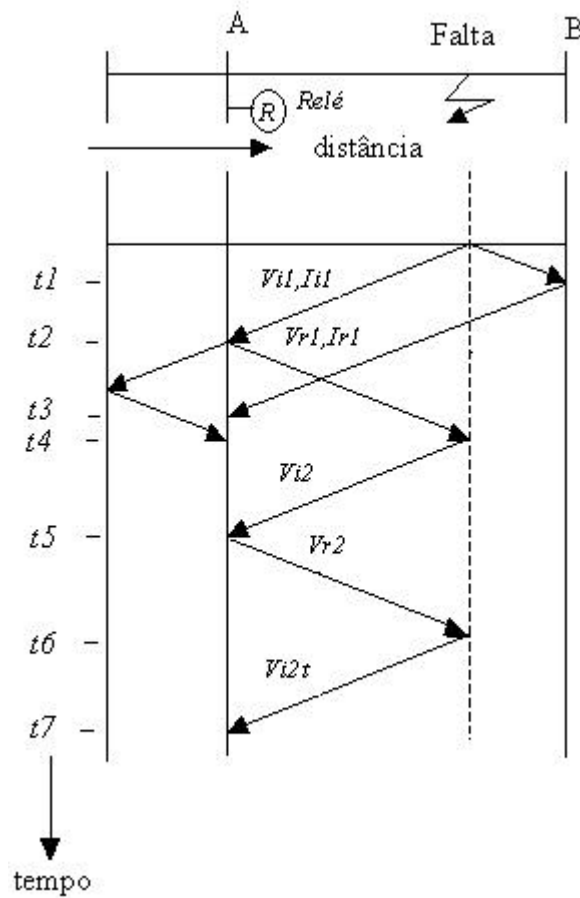


Fig.5.12. Diagrama de treliças para avaliação da Correlação-Cruzada.

e a função de covariância para a correlação-cruzada torna-se:

$$f(\mathbf{u}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [Vi(t+\mathbf{u}) - \overline{Vi(\mathbf{u})}][Vr1(t) - \overline{Vr1}] dt \quad (5.15)$$

Onde no caso ideal, o período T aproxima-se do infinito, contudo, no sentido de limitar o tempo de cálculo, a janela de correlação-cruzada é definida como a menor possível. Assim, utilizamos janelas cujo tempo total é definido pelo produto do tempo de amostragem das formas de onda e do número suficiente de amostras para identificar e medir a segunda onda incidente. O valor padrão adotado em nosso programa foi de 8 amostras, mas este pode ser ajustado pelo usuário.

Através das equações (3.61) e (3.62), que definem as ondas incidentes e refletidas no ponto de releamento ou de monitoração, a função de covariância definida pela equação

(5.15), irá processar uma seção do sinal da onda incidente $SI(t)$, que é calculada e armazenada, para em seguida, ser comparada com uma seção de um sinal $S2(t)$ da onda refletida, que também é calculada. A figura 5.13, mostra um exemplo destes sinais obtidos no programa.

Assim, o processo é repetido inúmeras vezes, começando inicialmente na seção armazenada e movendo o sinal através do deslocamento de cada seção no tempo, pelo período de uma amostra. A primeira seção é idêntica à seção armazenada e conseqüentemente a função de auto-correlação é o maior pico positivo, como pode ser observado na figura 5.14.

Como a seção continua a ser comparada ao longo do sinal, o grau de similaridade entre as seções começa a se tornar menor e a amplitude da função de auto-correlação se reduz. A redução continua até a seção correlacionada incluir uma nova onda viajante similar na forma com a onda inicial. Esta então, produzirá um máximo local ou um segundo pico positivo, que ocorrerá quando a seção correlacionada incluir uma onda refletida a partir da falta. O tempo requerido para o deslocamento do primeiro pico (seção inicial) ao maior máximo local, pode ser diretamente relacionado a distância a partir do ponto de medição à falta, obtendo-se assim, a informação para a localização da falta na linha de transmissão, cujo comando será apresentado a seguir.

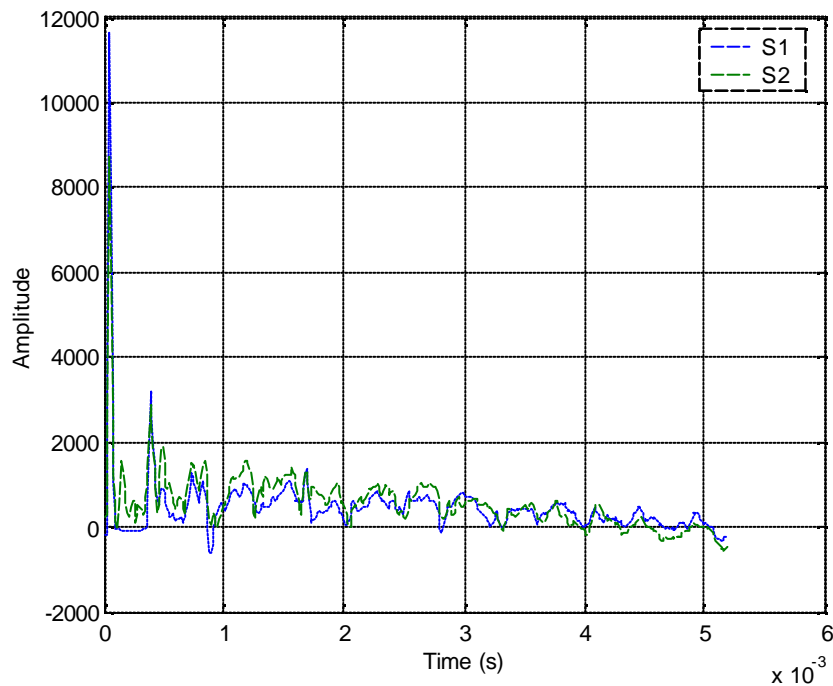


Fig.5.13. Sinais das ondas incidentes S1 e refletidas S2.

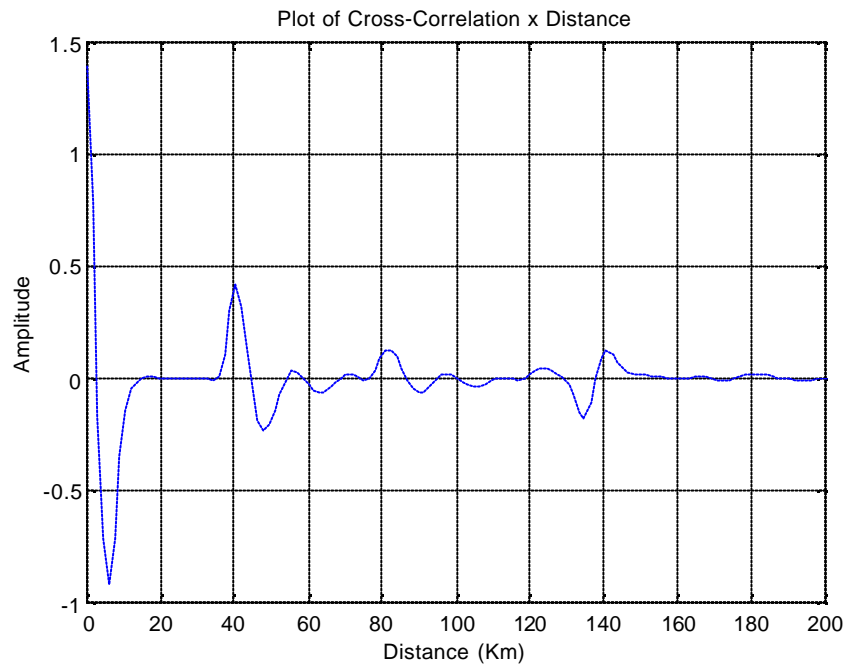


Fig.5.14. Resultado da Correlação-Cruzada dos sinais S1 e S2, indicando uma falta a 40 km do ponto de releamento.

5.3.8. *Fault Locator:*

Para concluir a apresentação dos comandos que fazem parte do programa desenvolvido, faremos uma explanação a respeito do comando *Fault Locator* ou o Localizador de Falhas.

Este é considerado o principal comando do programa, pois agrega todas as principais rotinas e funções anteriormente apresentadas nessa seção, encurtando o caminho para o usuário no objetivo de fazer a localização da falta no sistema de transmissão.

Na figura 5.15, reunimos as principais opções e ajustes, que o usuário do programa necessita definir, para efetuar o processamento completo dos sinais de tensão e corrente, com vistas à localização de faltas utilizando o FLATP.

Inicialmente, o usuário necessita ajustar a frequência do sistema, em seguida faz-se a escolha do arquivo '.pl4' com os sinais de tensão e corrente, provenientes de simulações no ATP. A análise dos sinais transitórios de tensão, permite a escolha entre sinais obtidos na simulação ou sinais estimados através dos sinais transitórios de corrente, conforme foi apresentado na seção 3.3.

O programa permite ainda, a escolha da matriz de transformação modal, a qual definimos como padrão, a matriz [S] representada pela equação (3.72). Outra matriz que

necessita ser definida é a matriz de impedância modal, cujos valores diagonais são calculados utilizando a equação (3.55) e que depende da configuração de cada sistema de transmissão a ser avaliado.

Precisamos também, definir o número de amostras na janela de correlação a ser utilizada pela rotina responsável pela correlação-cruzada de sinais de ondas incidentes e refletidas.

Feita estas definições preliminares, inicia-se o processamento dos sinais pela escolha das tensões de fase de uma linha saudável, isto é sem falta, e os sinais de corrente de fase da linha sob falta, para o cálculo das ondas incidentes $S1(t)$ e das ondas refletidas $S2(t)$, segundo as equações (3.61) e (3.62) do capítulo 3, e levando em conta a utilização do filtro modelado na seção 5.2, para a obtenção dos sinais de alta frequência.

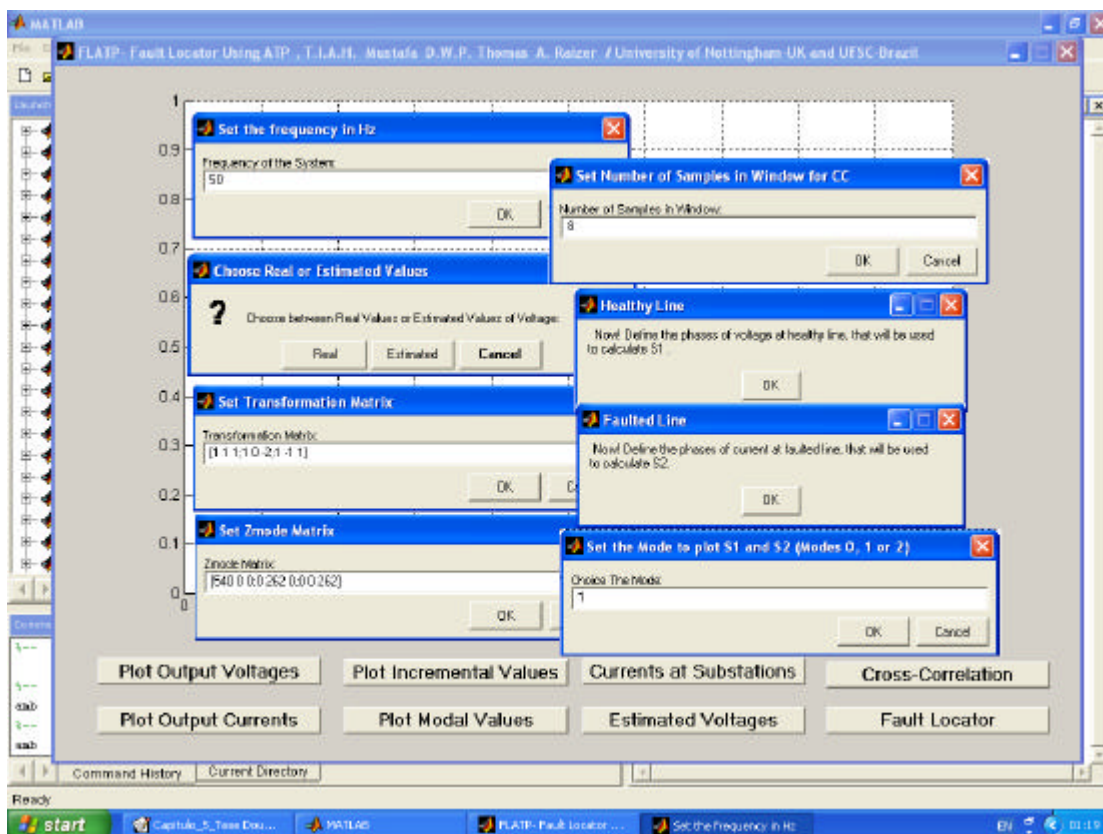


Fig.5.15. Opções e ajustes, quando da utilização do *Fault Locator*.

Portanto, com os valores das ondas incidentes e refletidas, faz-se a especificação do modo independente de propagação, considerando que apenas os modos aéreos 1 ou 2 são utilizados, devido a velocidade de propagação destes, não ser tão dependente da frequência

como o modo de terra 0. Em seguida, encaminhamos a aplicação da função de covariância, para a correlação destes sinais visando a identificação do pico máximo local e por conseguinte a localização da falta na linha de transmissão, como anteriormente foi mostrado na figura 5.14.

Assim, concluímos a seção que trata do comando responsável pela localização de faltas. Uma melhor ilustração será feita no capítulo seguinte, onde os resultados obtidos nos sistemas de transmissão, que serviram de referência ao nosso trabalho, serão apresentados.

5.4. Considerações Finais:

Neste capítulo, apresentamos o programa FLATP, desenvolvido para a análise de transitórios de ondas viajantes e para localização de faltas em sistemas de transmissão.

Utilizando dados de simulação do programa ATP, onde os sistemas de transmissão podem ser modelados, o programa desenvolvido neste trabalho oferece uma condição de análise comparativa de sinais transitórios, utilizando dados a partir de um único terminal em uma linha de transmissão e baseando-se no processamento pós-falta de fasores de tensão e corrente.

O programa conta com o auxílio de um filtro, que foi modelado para representar o comportamento de transdutores em subestações de EAT, bem como na obtenção de sinais de alta frequência, que são quantificados como valores incrementais, quando são subtraídos os valores de pré-falta em regime permanente.

Com os valores incrementais de tensão e corrente, trata-se de promover o desacoplamento das quantidades de fase em quantidades modais, para assim efetuarmos as devidas análises nas ondas viajantes associadas aos modos independentes de propagação em sistemas de transmissão.

Não podemos esquecer, que o programa prevê ainda, a opção de utilização de valores estimados de tensão em função dos valores de corrente, conforme metodologia apresentada no capítulo 3 e que motivou o desenvolvimento deste trabalho.

Passado as etapas de identificação dos sinais transitórios, que se propagam ao longo de linhas de transmissão, quando do surgimento de uma falta, inicia-se o processo de correlação destes sinais de ondas viajantes em um terminal da linha de transmissão, para desta forma, realizarmos a análise final e a localização da falta.

Assim, todos os principais comandos utilizados no programa desenvolvido, foram comentados e exemplificados, como também foram feitas considerações a respeito da modelagem do filtro para componentes de alta frequência e da aplicação da teoria de correlação-cruzada em sistemas de transmissão.

No capítulo a seguir, são apresentados os resultados simulados e obtidos com o programa, e que serão devidamente comentados.

Capítulo 6

Resultados Obtidos com Aplicação do Programa FLATP em Sistemas de Transmissão

Os transitórios de alta frequência das formas de ondas de tensão e corrente contém importantes informações sobre a localização de faltas. Assim, a análise e interpretação destes transitórios, podem favorecer a identificação dos fatores que afetam a precisão dos algoritmos direcionados à localização de faltas.

Portanto, neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com a ferramenta computacional FLATP, desenvolvida no nosso trabalho, e que é voltada à análise de transitórios de ondas viajantes e sua aplicação na localização de faltas, ao qual foram submetidos a avaliação, o sistema de transmissão em 400 kV britânico *Scottish Power* e o sistema brasileiro em 525 kV da Eletrosul, modelados e simulados no ATP.

6.1. O Sistema *Scottish Power*:

O sistema de transmissão britânico do *Scottish Power* em 400 kV, foi proposto como um sistema teste ao nosso projeto, durante o estágio de doutoramento em Nottingham.

Trata-se de um sistema de potência em EAT altamente interconectado, e que por essa razão, apenas uma seção desse sistema foi modelada no *ATPDraw*, conforme mostra a figura 4.11, considerando as linhas mais relevantes e cujos comprimentos são fornecidos no anexo 5.

Após a simulação desse sistema no ATP, considerando algumas condições de falta, realizou-se a análise dos sinais de corrente e tensão gerados, bem como a aplicação do FLATP para a localização de faltas, utilizando valores simulados e estimados de tensão transitória.

A seguir, são apresentados alguns dos resultados obtidos com dois eventos, que ocorreram na linha de transmissão *Strathaven-Inverkip*, cujo comprimento é de 92,2 km [49]. O primeiro evento, foi uma falta *fase-a* para *terra*, que ocorreu a 84,6 km a partir da subestação Strathaven. A figura 6.1, mostra os modos 1 de transitórios de corrente de alta frequência, registrados na subestação Strathaven [49].

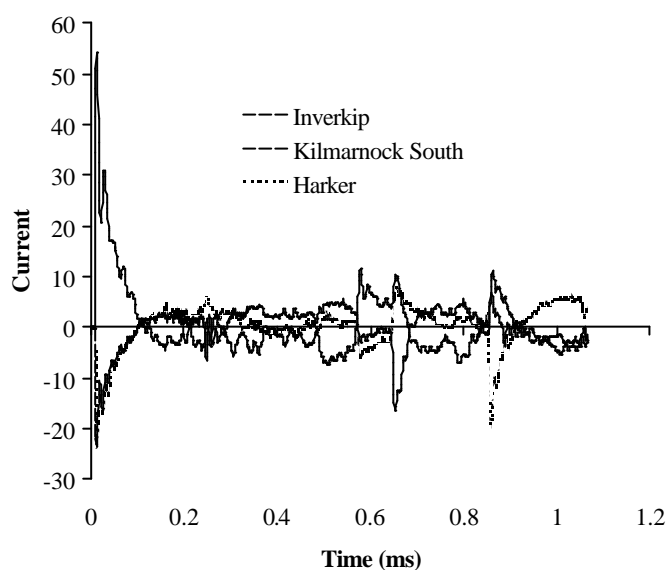


Fig.6.1. Modos 1 de transitórios de corrente para a falta monofásica-terra.

Num comparativo com os registros na subestação, a figura 6.2 mostra o resultado obtido através da simulação do sistema *Scottish Power*, onde os sinais de corrente de fase das linhas *Strathaven-Inverkip*, *Strathaven-Kilmarnock* e *Strathaven-Harker*, tiveram subtraído os valores de pré-falta em regime permanente na frequência de 50 Hz, através do comando *Currents at Substations* do programa FLATP, com a opção de desacoplamento desses valores de fase em valores modais, como exposto no capítulo 5.

A figura 6.3 ilustra os sinais das ondas incidentes *S1* e refletidas *S2* na subestação Strathaven, que foram processados utilizando-se as equações (3.61) e (3.62) e serão correlacionadas conforme a teoria de correlação-cruzada apresentada no capítulo anterior, no sentido de identificar a localização da falta.

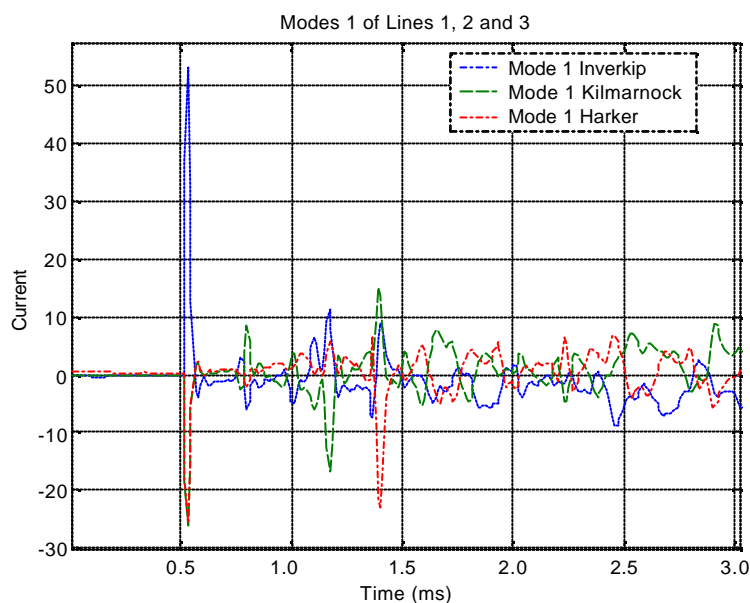


Fig.6.2. Modos 1 de transitórios de corrente obtidos através de simulação do sistema *Scottish Power*.

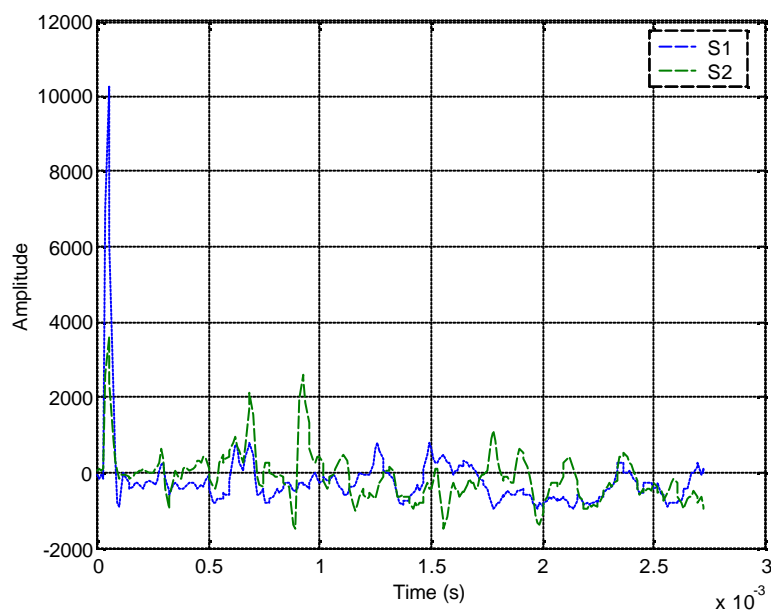


Fig.6.3. Ondas incidentes *S1* e refletidas *S2* na subestação Strathaven depois da falta.

A figura 6.4 apresenta o resultado final de todo o processo, que inicia pela análise de sinais de tensão e corrente, passa pela utilização de filtros, a obtenção dos valores incrementais, o desacoplamento em valores modais, o cálculo dos sinais de ondas incidentes e refletidas acima, até a realização da correlação, para identificar a localização da falta através do máximo local ou segundo maior pico positivo em amplitude, conforme relatado no capítulo 5, que fica em torno de 85 km de Strathaven.

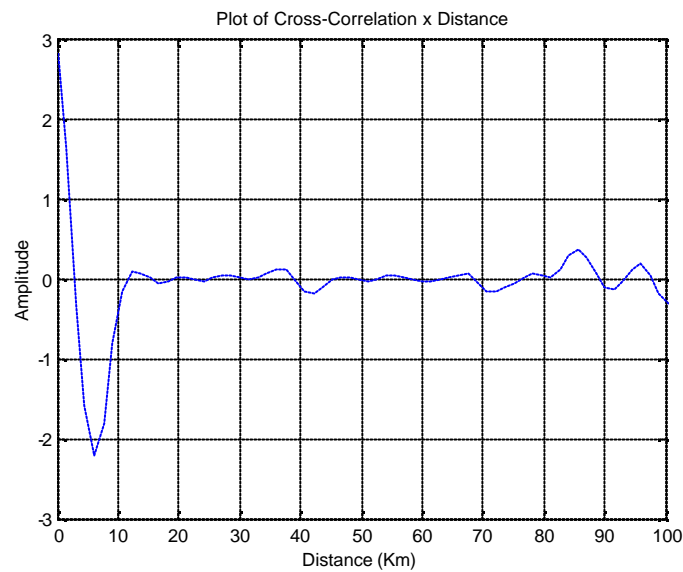
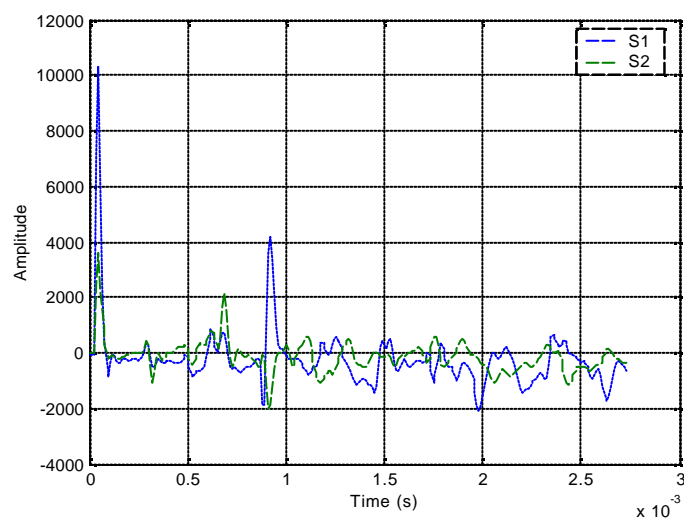
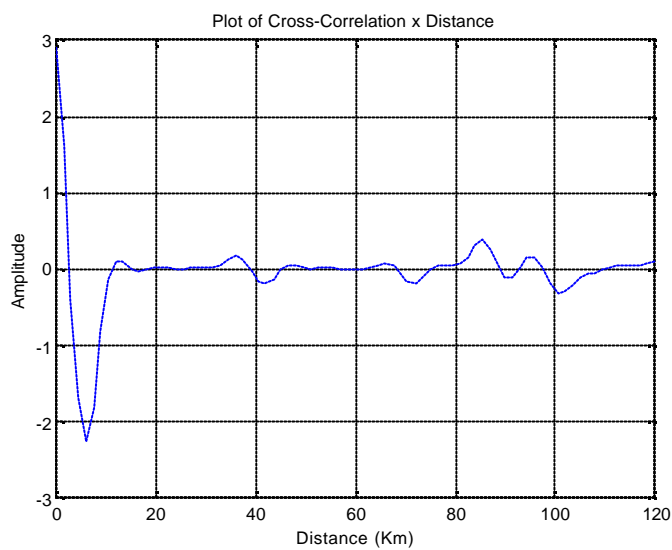


Fig. 6.4. A localização da falta *fase-a* para *terra*, em torno de 85 km de Strathaven.

Repetiu-se o processo para identificação da localização da falta na mesma linha de transmissão, utilizando-se somente sinais de corrente em uma linha saudável, a *Strathaven-Harker* para estimar a tensão transitória, conforme descrito na metodologia apresentada na seção 3.5 do capítulo 3. A figura 6.5, mostra os sinais de ondas incidentes e refletidas no barramento da subestação em estudo, e a correlação indicando a posição da falta também em torno de 85 km, utilizando-se valores estimados de tensão em função de correntes, demonstrando que a metodologia de estimação de tensões transitórias pode render resultados semelhantes.



(a)



(b)

Fig.6.5. (a) Ondas incidentes e refletidas, (b) Correlação-cruzada, utilizando valores estimados de tensão.

O segundo evento, foi uma falta *bifásica fase-b fase-c*, que ocorreu a 21 km a partir da subestação Strathaven. A figura 6.6, mostra os modos 2 de transitórios corrente de alta frequência, registrados no barramento da subestação [49].

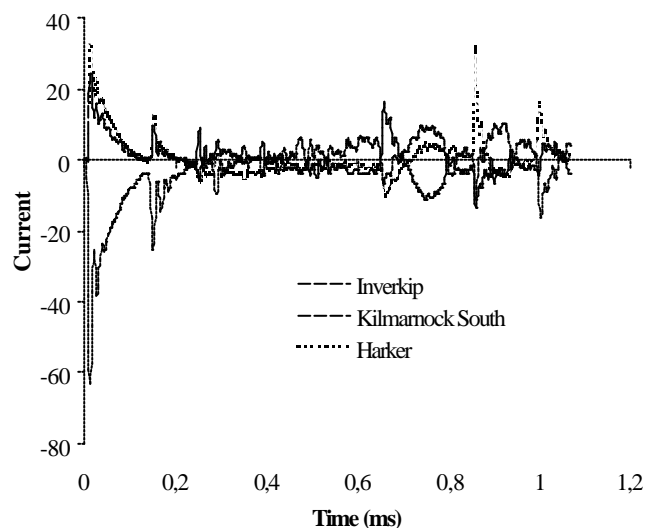


Fig.6.6. Modos 2 de transitórios de corrente para a falta *bifásica*.

A figura 6.7, mostra o resultado obtido através da aplicação novamente do comando *Currents at Substations* do programa, em que os sinais de corrente das linhas

conectadas à subestação *Strathaven*, também tiveram subtraídos os valores de pré-falta em regime permanente na frequência de 50 Hz, com a opção de desacoplamento desses valores de fase em valores modais, utilizando o arquivo de simulação da falta no ATP.

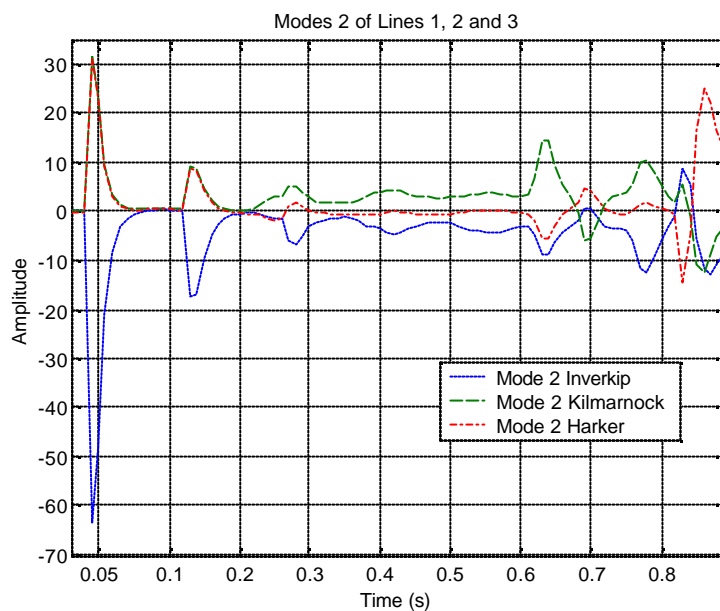


Fig.6.7. Modos 2 de transitórios de corrente, obtidos através de simulação .

Como no caso da falta *monofásica-terra*, a figura 6.8, mostra os sinais das ondas incidentes *S1* e refletidas *S2* na subestação *Strathaven*, que foram simulados e correlacionados, no sentido de identificar a localização da falta *bifásica*.

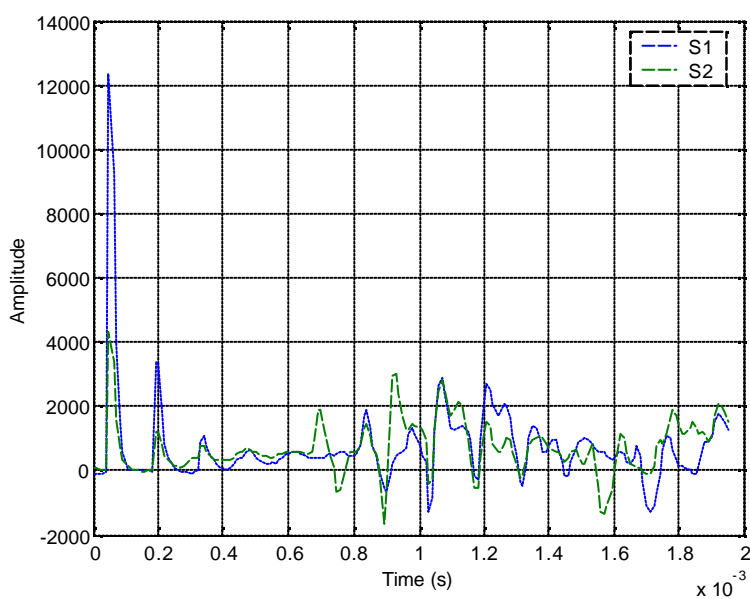


Fig.6.8. Ondas incidentes *S1* e refletidas *S2* na subestação depois da falta *bifásica*.

A figura 6.9 apresenta o resultado final de todo processo de análise de sinais de tensão e corrente, que passa por diferentes etapas como no caso anterior, até identificar a localização da falta através do máximo local, em torno de 21 km de Strathaven.

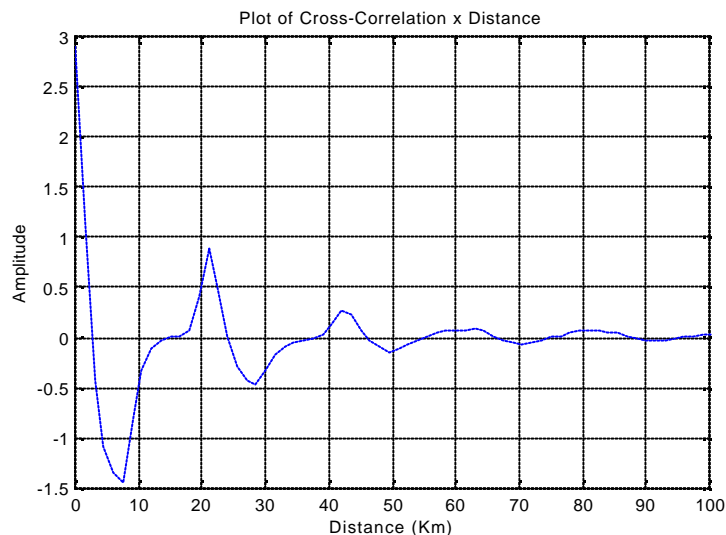
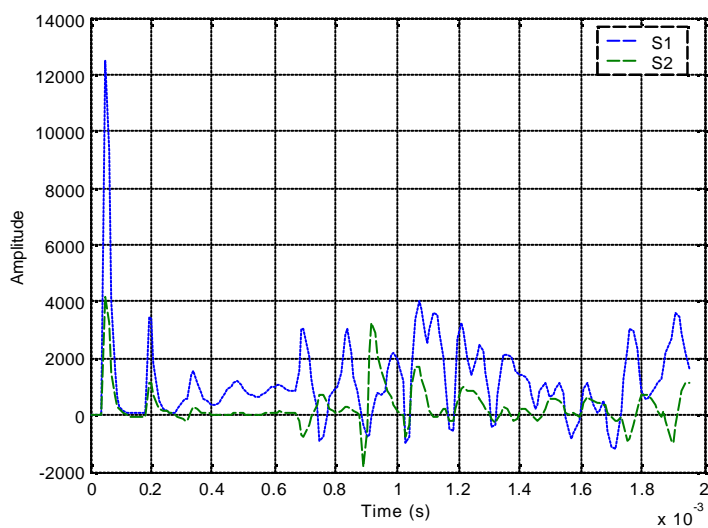


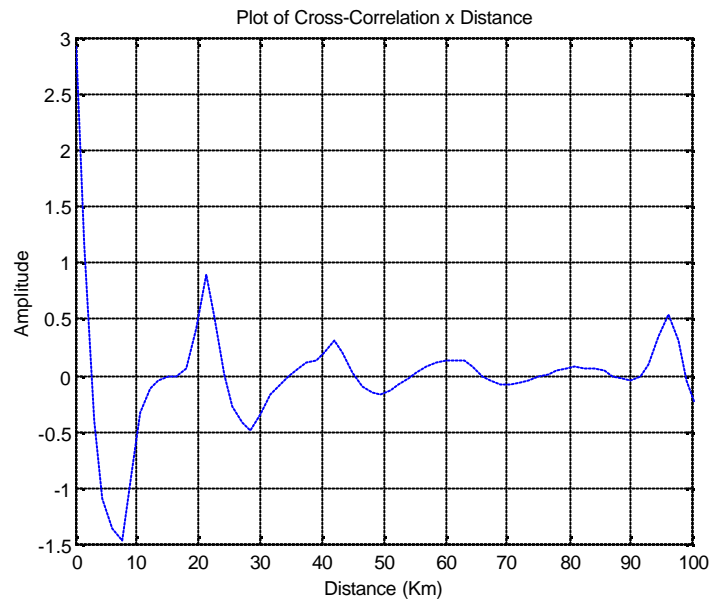
Fig.6.9. A localização da falta bifásica *fase-b fase-c*, em torno de 21 km de Strathaven.

Da mesma forma, que foi realizado para a identificação da localização da falta *monofásica-terra*, utilizamos somente sinais de corrente, e para estimar a tensão transitória utilizamos as correntes na linha saudável *Strathaven-Kilmarnoch*.

A figura 6.10 mostra os sinais de ondas incidentes e refletidas no barramento da subestação, e a correlação-cruzada indicando a posição da falta, utilizando-se valores estimados de tensão.



(a)



(b)

Fig.6.10.(a) Ondas incidentes e refletidas, (b) Correlação-cruzada, utilizando valores estimados de tensão transitória para a falta *bifásica*.

Observamos, que a ferramenta desenvolvida se enquadra perfeitamente para reproduzir e analisar os transitórios de alta frequência gerados por faltas em sistemas de transmissão. Outro aspecto a ser observado, é a boa precisão de resultados favorecendo a localização de faltas.

Cabe ressaltar ainda, que um fator primordial para o comparativo de resultados com os registros na subestação, deve-se ao fato da taxa de amostragem dos equipamentos de medição utilizados, que no caso do sistema britânico foram amostrados sincronizadamente nas 3 fases, numa taxa de amostragem de 1,25 MHz (num passo de tempo de 800 ns) [49]. Portanto, a precisão do resultado de localização de falta, depende intimamente da frequência de amostragem, pois esta controla o comprimento das seções da linha de transmissão.

Em seguida, serão apresentados obtidos com o sistema brasileiro da Eletrosul, cujos equipamentos instalados nas subestações são voltados única e exclusivamente à proteção, segundo algoritmos baseados na impedância da linha, e com uma taxa de amostragem bem reduzida, se comparada sistema ao britânico.

6.2. O Sistema Eletrosul:

O sistema de transmissão brasileiro da Eletrosul em 525 kV, foi proposto como um sistema teste ao nosso trabalho, por tratar-se de uma proposta original e que rendeu um convênio de parceria entre o PPGEEL/UFSC- *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina* e a *Eletrosul- Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A.*

Este sistema é a principal malha do sistema da Eletrosul, responsável por transferir a energia gerada nas grandes usinas hidroelétricas para os centros de carga da região sul. Essa malha, constituída por 2581,9 km de linhas de transmissão, também faz a interligação com a região sudeste do Brasil. Por tratar-se, de um sistema de potência em EAT com muitas linhas de transmissão, apenas uma seção desse sistema foi modelada no *ATPDraw*, conforme mostra a figura 4.12, considerando as linhas mais relevantes e cujos comprimentos são dados no anexo 5.

Após a simulação desse sistema no ATP, também segundo algumas condições de falta, realizou-se a análise dos sinais de corrente e tensão gerados, bem como a aplicação do FLATP, para a localização de faltas em diferentes pontos da linha de transmissão, utilizando valores simulados e estimados de tensão transitória. Mas devido a taxa de amostragem dos equipamentos da Eletrosul ser em torno de 5,7 kHz, o comparativo com sinais registrados nas subestações ficou prejudicado em nossa proposta, o que será demonstrado em seguida.

Desta forma, procurou-se observar e analisar os aspectos que afetam a localização de faltas em algoritmos baseados em ondas viajantes, tais como faltas com ângulo de incidência próximo de zero e faltas próximas ao ponto de releamento [15] e [42].

A seguir, são apresentados alguns dos resultados obtidos com a simulação de faltas na linha de transmissão *Areia-Ivaiporã*, cujo comprimento é de 173,2 km.

A figura 6.11 mostra as tensões de fase e a saída no filtro, descrito no capítulo 5, que foram obtidos através de simulação no circuito da subestação *Areia*, para uma falta monofásica *fase-c* para terra, que ocorreu a 40 km da subestação.

A figura 6.12 mostra os sinais de correntes de fase e os mesmos na saída do filtro.

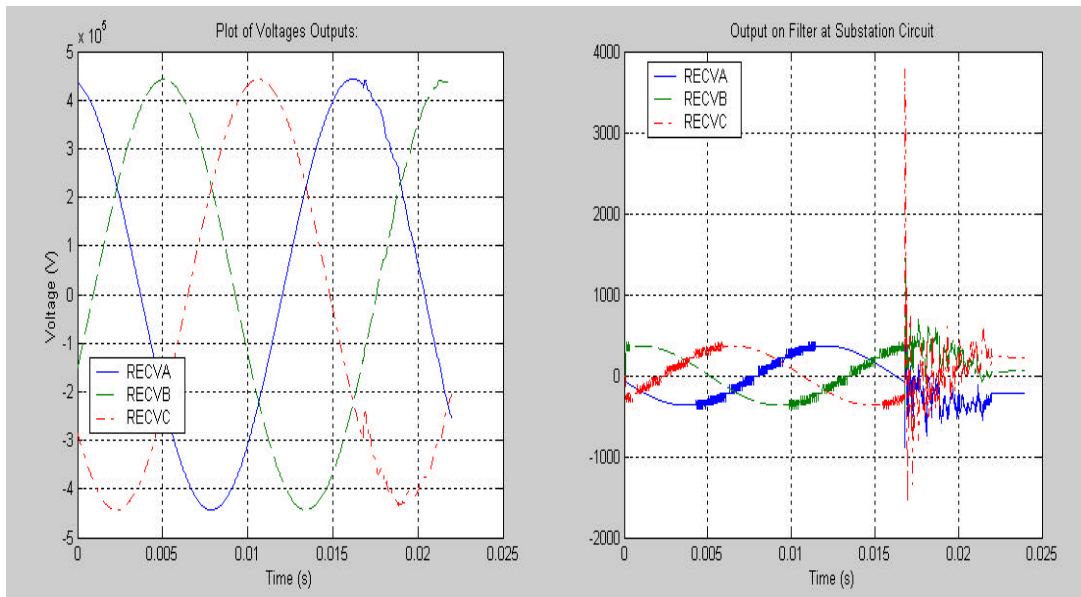


Fig. 6.11. Tensões de fase e a saída do filtro no circuito da subestação *Areia*, para uma falta monofásica terra.

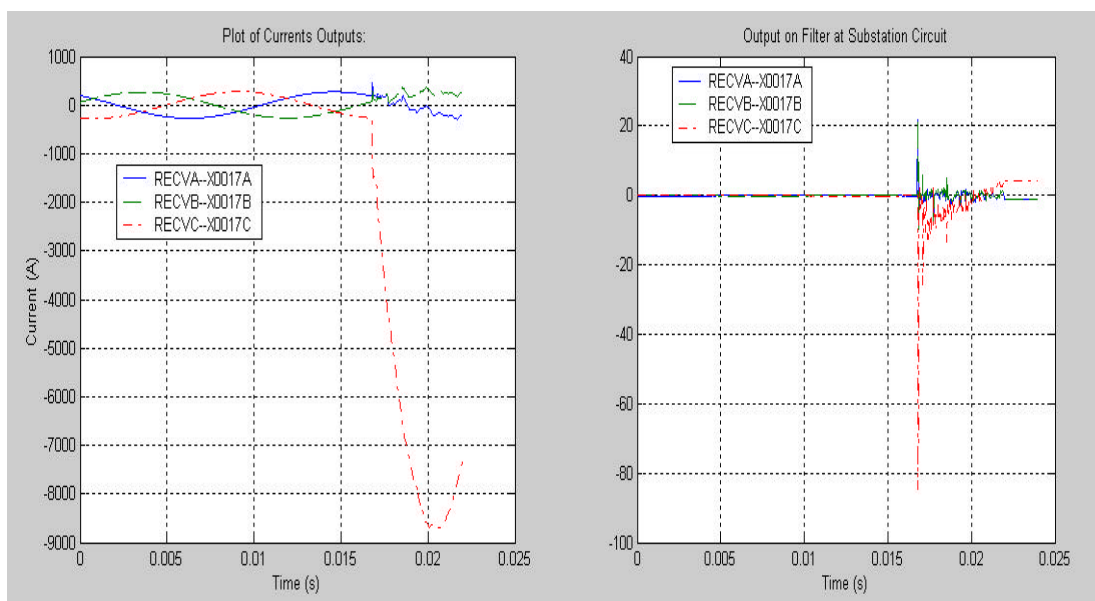


Fig. 6.12. Correntes de fase e a saída do filtro no circuito da subestação *Areia*, para uma falta monofásica terra.

Para concluir a análise da simulação deste evento, a figura 6.13 apresenta os resultados obtidos com os sinais das ondas incidentes e refletidas no barramento da subestação *Areia*, bem como da correlação-cruzada destes, para a determinação da localização da falta a 40 km da subestação.

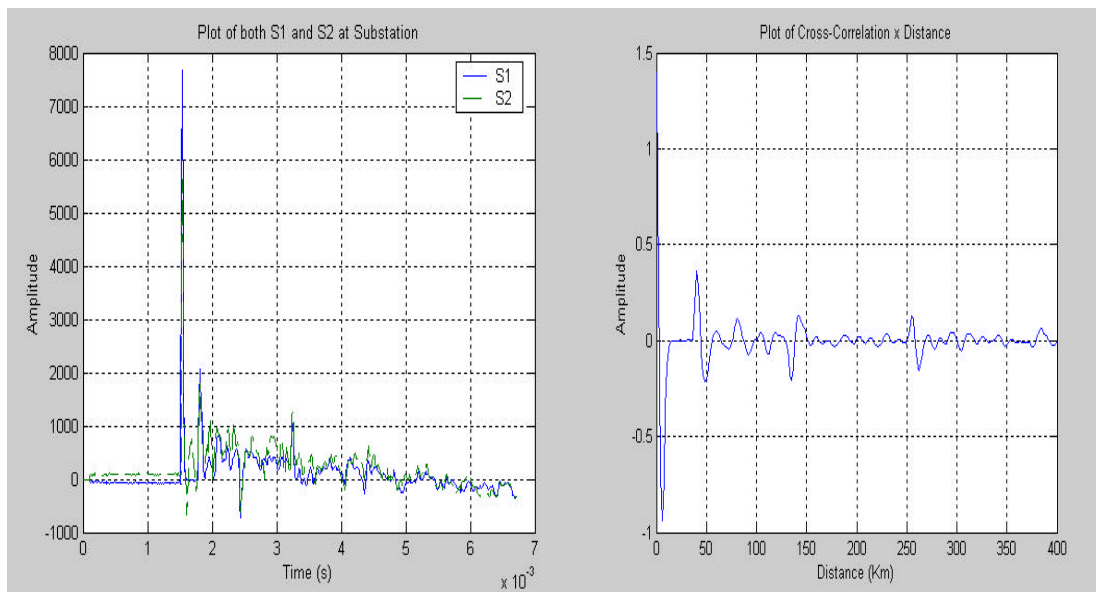
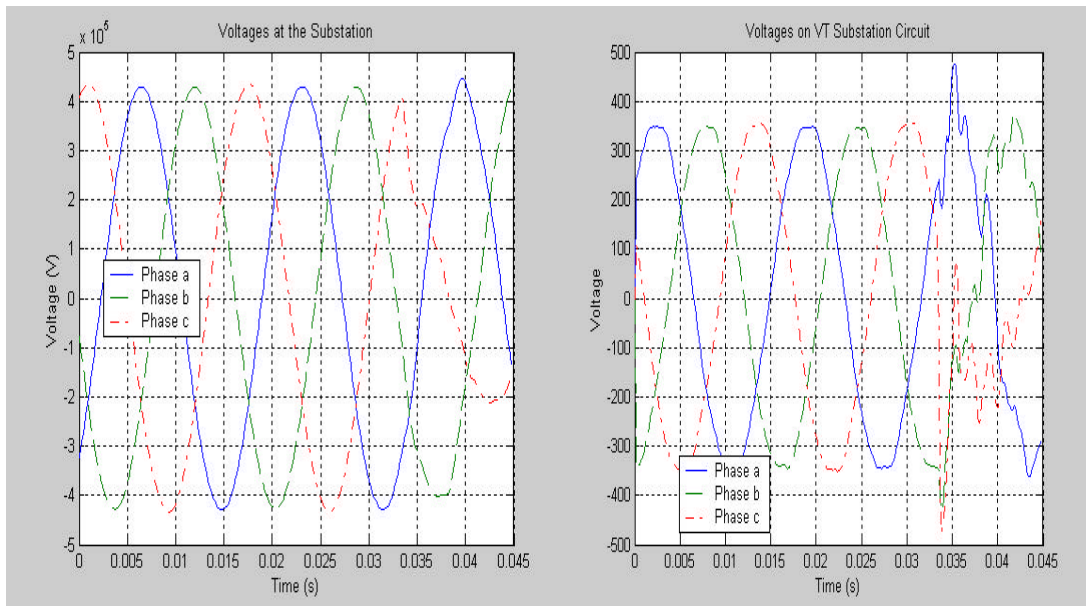


Fig. 6.13. Sinais de ondas incidentes e refletidas na subestação *Areia* e a localização da falta monofásica terra a 40 km da subestação.

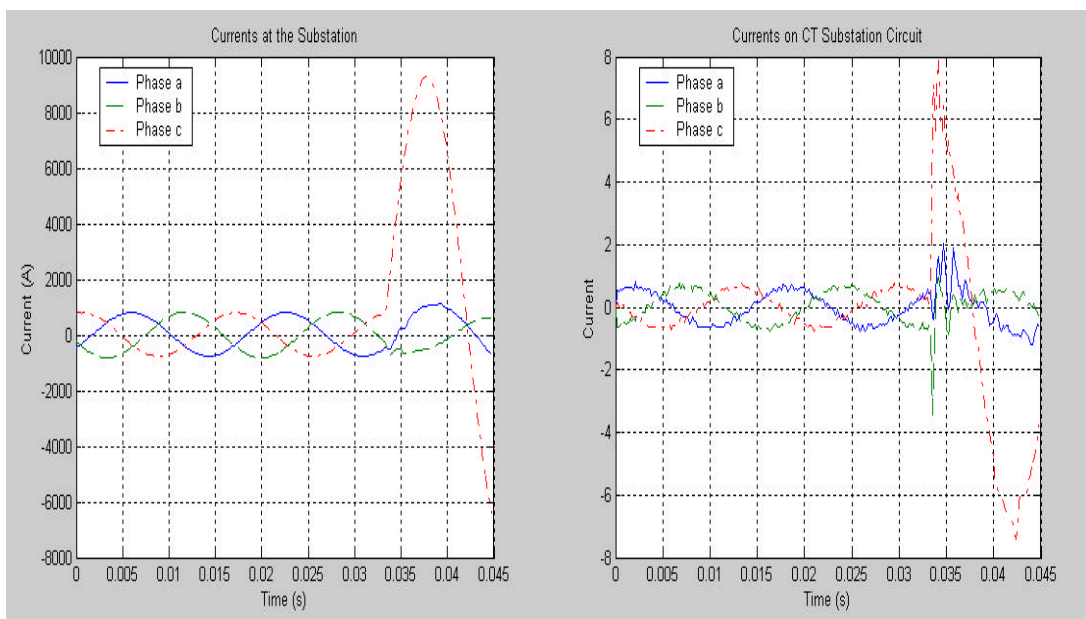
Conforme citado anteriormente, devido a taxa de amostragem dos equipamentos da Eletrosul, serem em torno de 5,7 kHz, o comparativo com sinais registrados nas subestações ficou comprometido, pois com essa taxa de amostragem os sinais de alta frequência das ondas viajantes não são registrados, sem falar nos convencionais transformadores de potencial capacitivos, que funcionam como verdadeiros filtros para altas frequências.

Na simulação, não tivemos dificuldades, por justamente utilizarmos uma taxa de amostragem em torno de 100 kHz, com uma modelagem mais próxima do sistema real, que inclui as altas frequências, [2] e anexo 4.

A figura 6.14 mostra os sinais reais de tensão e corrente registrados na subestação *Areia*, para o evento que aqui foi apresentado. Estes sinais foram processados com filtro no programa FLATP, utilizando uma rotina adicional que permite a entrada de dados reais, obtidos nos registradores em formato *comtrade*.



(a)



(b)

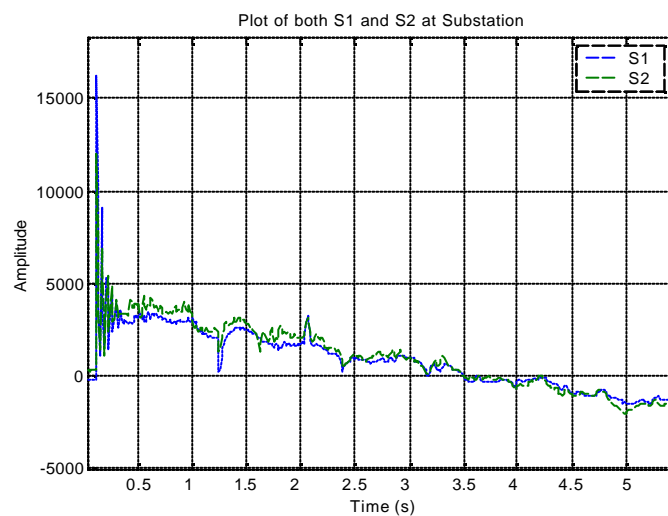
Fig. 6.14. Sinais reais de tensão (a) e corrente (b) registrados na subestação *Areia*, para a falta monofásica-terra.

A análise comparativa dos sinais reais com os sinais simulados demonstra a limitação imposta pela taxa de amostragem, uma vez que as altas frequências são melhor visualizadas nos sinais que foram simulados, conforme figuras 6.11 e 6.12.

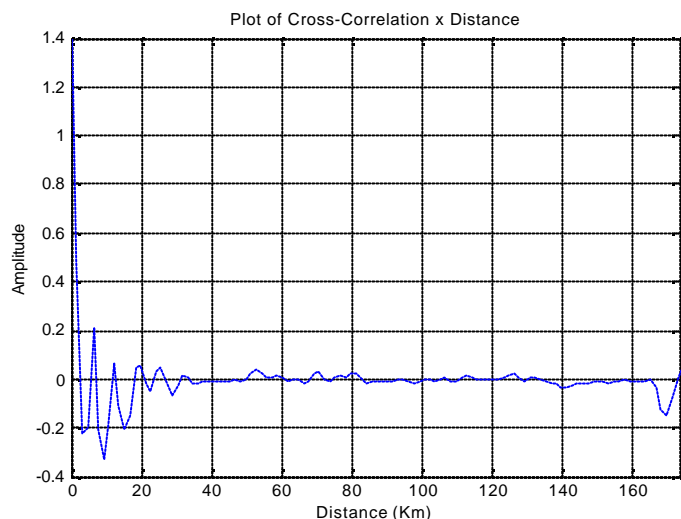
Outros aspectos, que agora serão ilustrados, tratam de algumas deficiências que surgiram em esquemas de proteção baseados em ondas viajantes. Embora estes forneçam uma ferramenta rápida para a detecção e a localização de faltas, a propagação de ondas podem ser excepcionalmente afetada pelos parâmetros e configuração do sistema. Outras dificuldades, surgem para faltas próximos aos barramentos e para aquelas faltas ocorrendo próximo ao zero no ângulo de incidência da tensão.

Para faltas muito próximas, a diferença de tempo entre a chegada de uma onda incidente e a chegada de suas reflexões a partir do barramento será muito curta. Isso pode fazer a interpretação da informação disponível nos primeiros poucos milissegundos depois da chegada da frente de onda, algo quase impraticável.

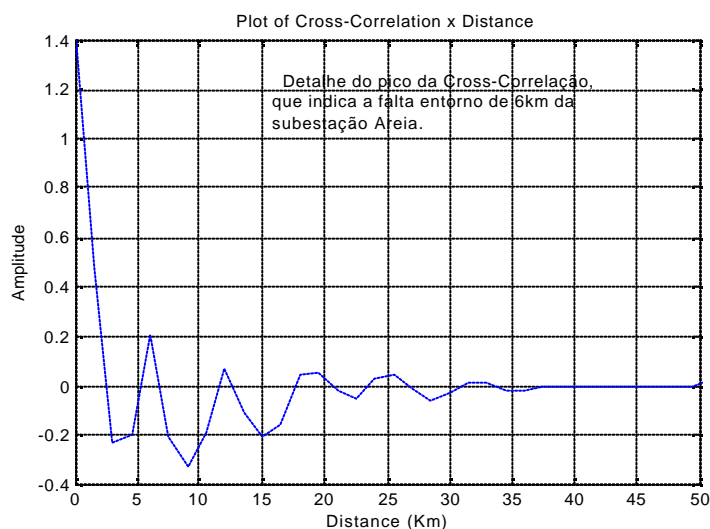
A figura 6.15, mostra os resultados obtidos na simulação de uma falta monofásica-terra a 6 km da subestação *Areia*, na linha *Areia-Ivaiporã*. Inicialmente são apresentados os sinais de ondas incidentes e refletidas (a), em seguida o resultado da correlação-cruzada (b) e uma ampliação desse resultado para uma melhor visualização (c).



(a)



(b)



(c)

Fig.6.15. Resultados para a simulação de uma falta a 6km da subestação.

Dentre várias simulações realizadas, esta forneceu o melhor resultado para faltas próximas ao barramento da subestação. Soluções para esta deficiência, seriam a implementação de um algoritmo híbrido [36], aliando a capacidade de detecção rápida da falta de esquemas de proteção de ondas viajantes e as técnicas de medição de impedância. Estas seriam utilizadas em paralelo, num único esquema de proteção, produzindo assim um relé de distância de alta velocidade e confiável. Outra solução seria a avaliação dos sinais de alta frequência, utilizando o outro terminal remoto da linha de transmissão para a confirmação da localização da falta. Considerações à cerca dessas sugestões, serão feitas nas conclusões finais deste trabalho.

Quanto a faltas ocorrendo num ângulo de incidência da tensão próximo de zero graus, sabemos que estas faltas não irão gerar muitas componentes de ondas viajantes. A figura 6.16 mostra as tensões de fase na subestação *Areia*, para a falta monofásica-terra simulada, só que agora num ângulo de incidência da tensão próximo de zero, a identificação da falta é dificultada, necessita-se assim, analisar as correntes de fase nas linhas conectadas à subestação. A figura 6.17 mostra as correntes de fase da linha onde ocorreu a falta, facilitando assim, a sua identificação.

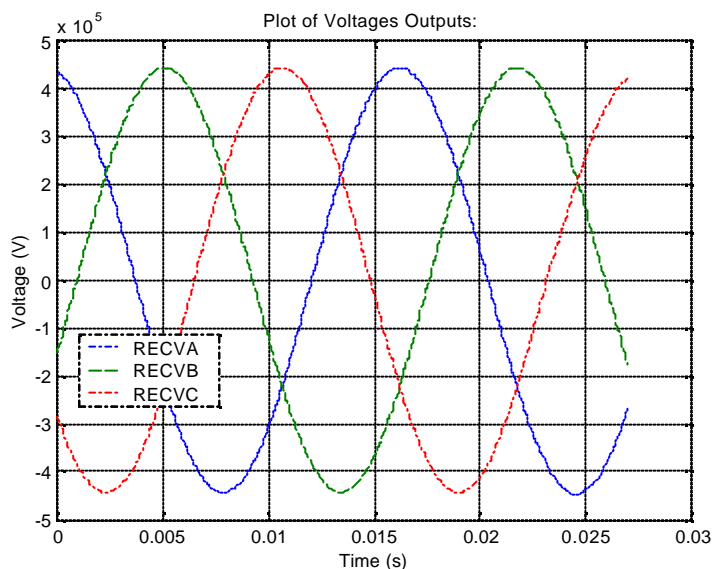


Fig.6.16. Tensões de fase na subestação, para a falta num ângulo de incidência da tensão próximo de zero.

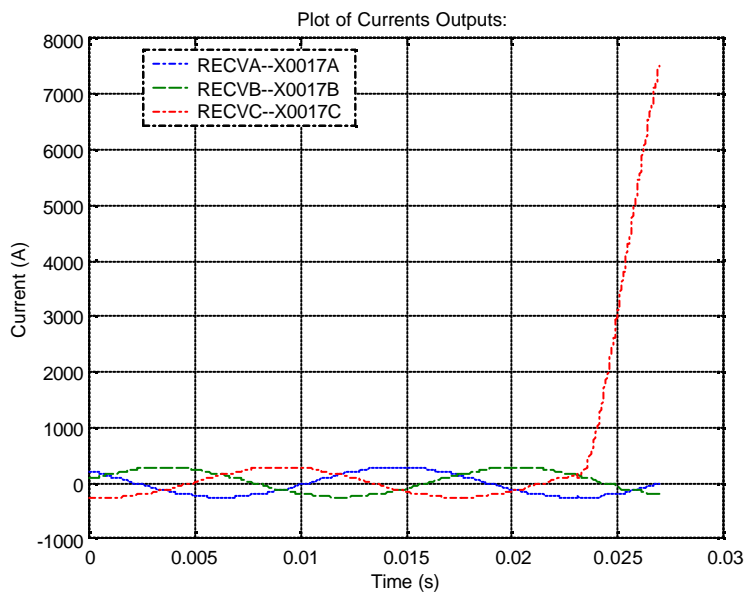


Fig.6.17. Correntes de fase na linha *Areia-Ivaiporã*, para a falta num ângulo de incidência próximo de zero.

A figura 6.18 mostra os sinais das ondas incidentes e refletidas no barramento da subestação, para a falta simulada com um ângulo de incidência próximo de zero.

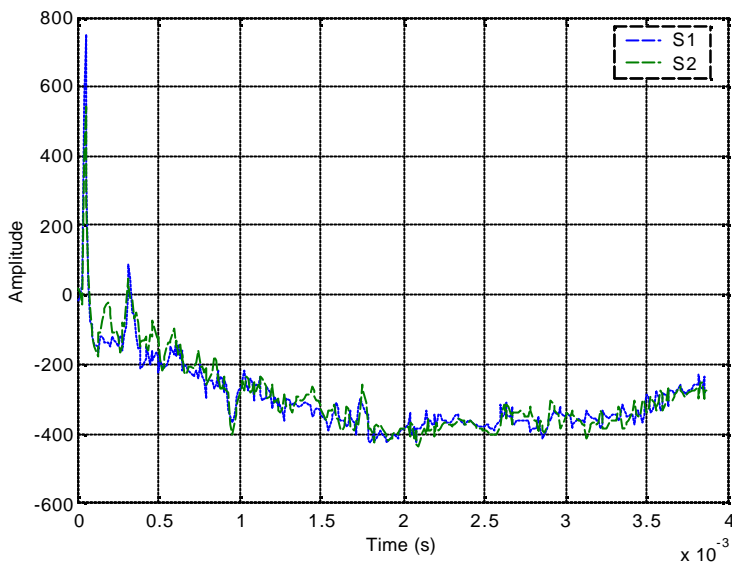


Fig.6.18. Sinais de ondas das ondas incidentes e refletidas, para a falta com um ângulo de incidência próximo de zero.

A figura 6.19 ilustra o resultado final, com a correlação-cruzada dos sinais obtidos na figura 6.18, e a indicação da falta simulada, que ocorreu a 40 km da subestação. Na figura 6.20 seguinte, apresentamos somente o resultado de todo o processo de análise dos mesmos sinais, só que agora utilizando a estimação da tensão transitória.

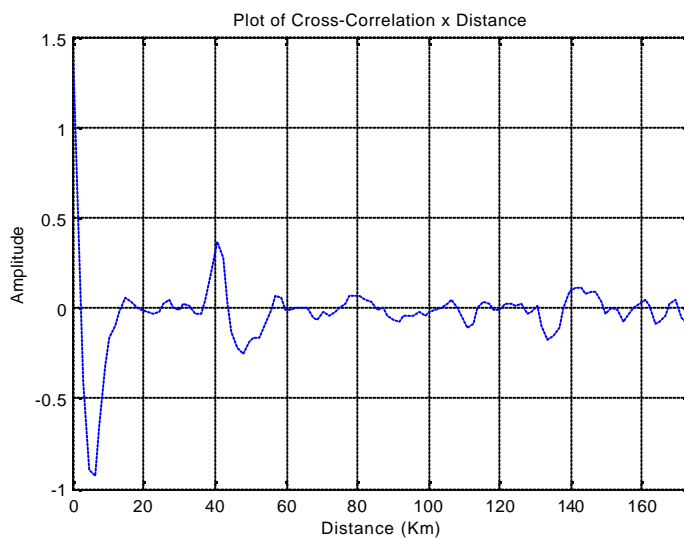


Fig. 6.19. Correlação-cruzada indicando uma falta a 40 km da subestação.

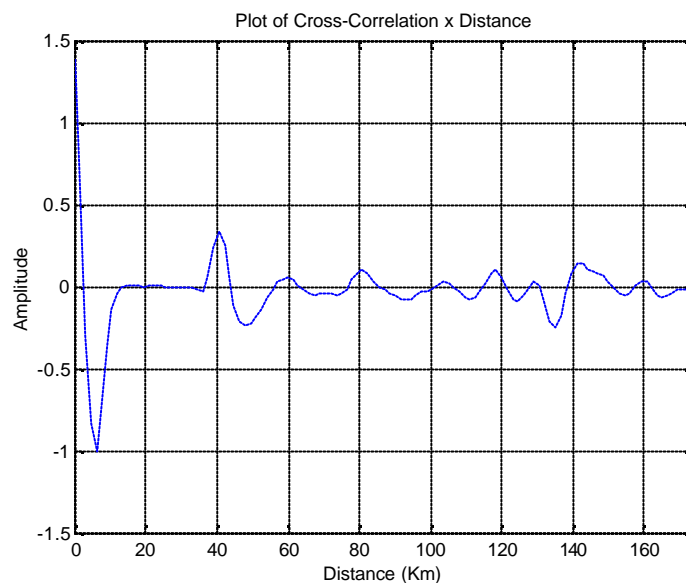
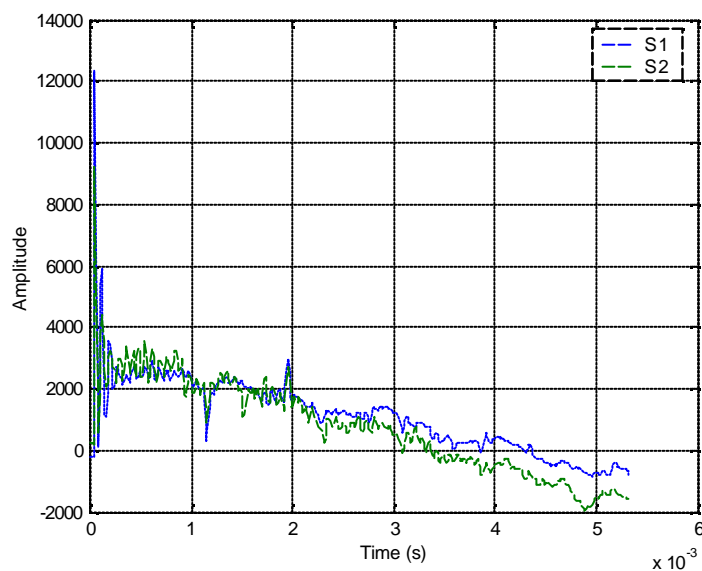
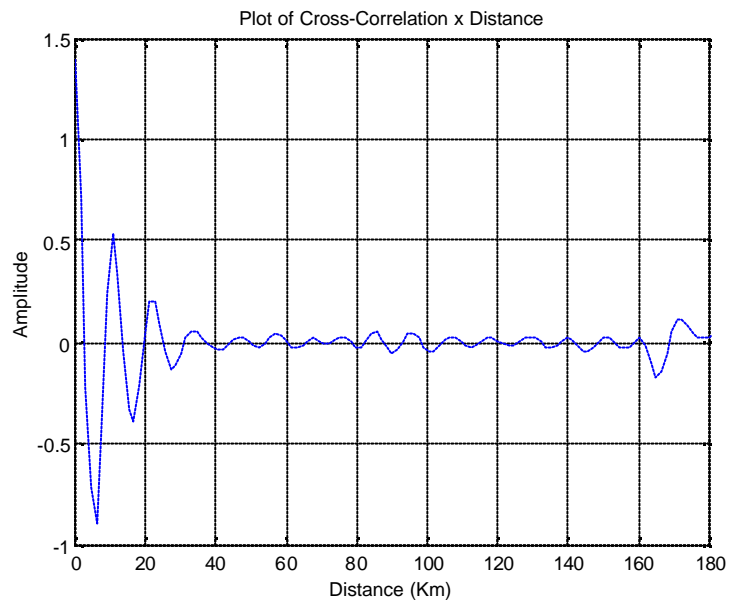


Fig. 6.20. Correlação-cruzada indicando uma falta a 40 km da subestação, utilizando a estimação de tensão transitória.

Para concluir a apresentação de resultados obtidos com sinais de ondas incidentes e refletidas, e sua correlação-cruzada utilizando o programa FLATP no sistema da Eletrosul, simulamos uma falta monofásica-terra a 10 km da subestação *Areia*, figura 6.21, uma falta bifásica a 60 km, figura 6.22, e por fim uma falta monofásica-terra a 172 km da mesma subestação, figura 6.23.

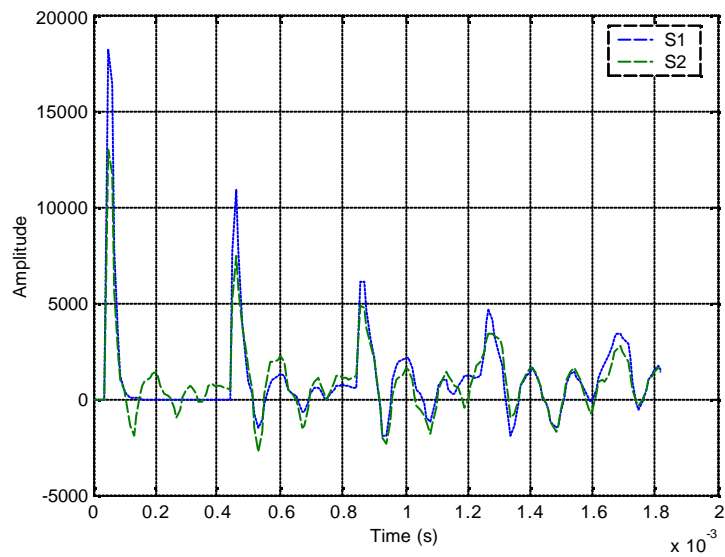


(a)

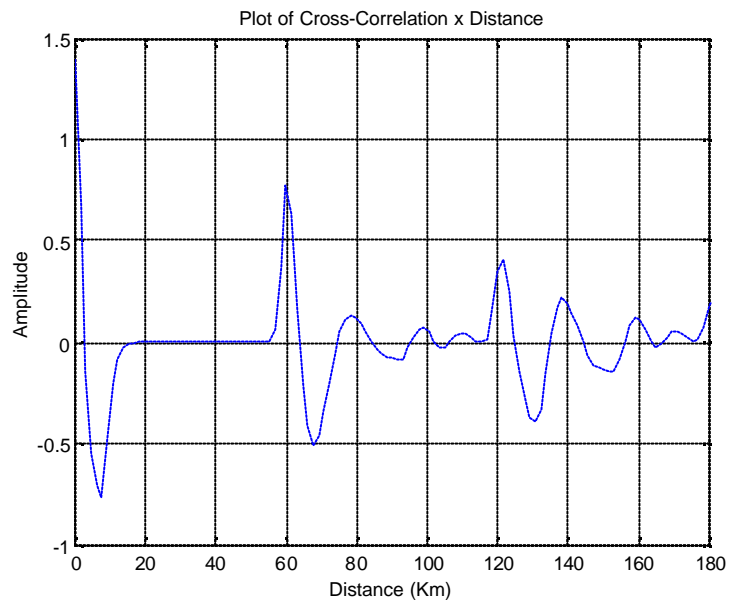


(b)

Fig.6.21. Resultados obtidos para uma falta monofásica-terra a 10 km da subestação.

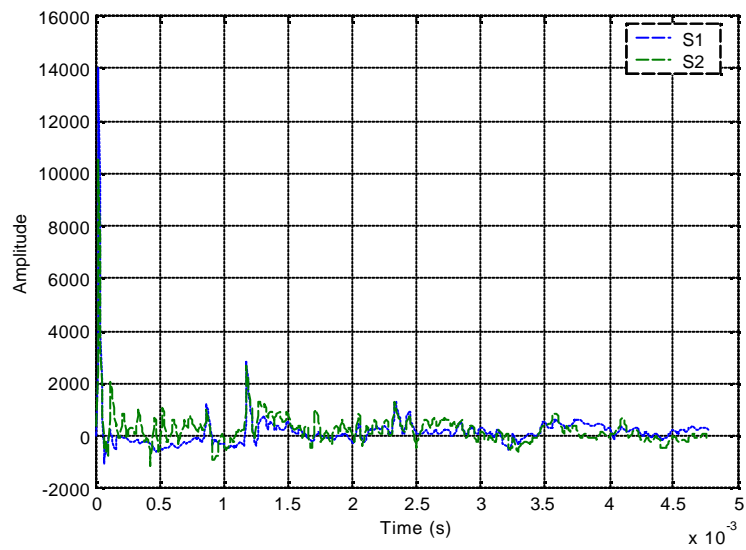


(a)

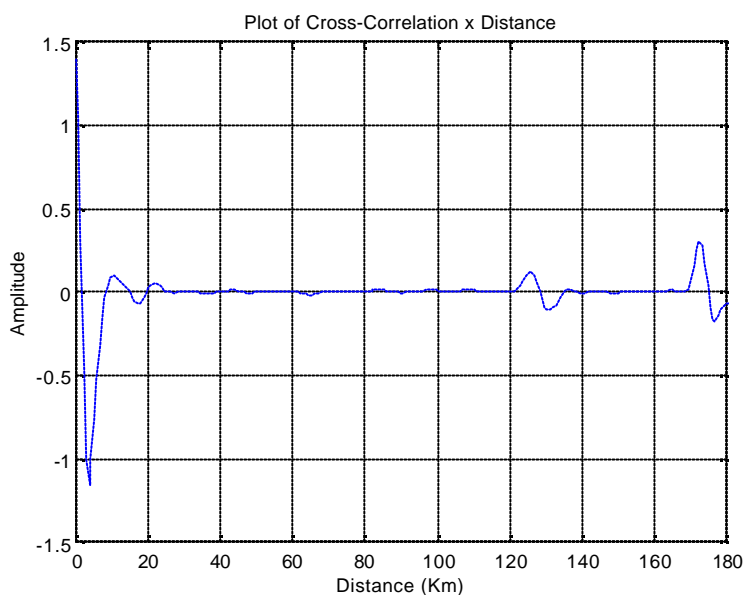


(b)

Fig.6.22. Resultados obtidos para uma falta bifásica a 60 km da subestação.



(a)



(b)

Fig.6.23. Resultados obtidos para uma falta monofásica a 172 km da subestação.

6.3. Considerações Finais:

Neste capítulo, foram apresentados os principais resultados obtidos com a análise de sinais transitórios em dois sistemas teste.

As avaliações realizadas, tanto no sistema *Scottish Power*, como no sistema da Eletrosul, demonstram que o emprego do programa FLATP desenvolvido para a análise comparativa de transitórios de alta frequência e a localização de faltas em sistemas de transmissão, possui validade em ambos os sistemas, mas sua aplicabilidade ficou restringida ao sistema britânico, pois apenas nele tivemos condições de comparar os sinais simulados com os registros reais do sistema, amostrados numa taxa de 1,25 MHz.

O mesmo não ocorreu no sistema brasileiro, principalmente pelo fato dos equipamentos registradores de sinais transitórios utilizados nas subestações, possuírem uma taxa de amostragem limitada, dificultando a identificação dos transitórios de alta frequência. Para buscar uma alternativa a esta limitação, sugerimos o desenvolvimento de um algoritmo associado a um processador digital de sinais, para implementação de um registrador de sinais de alta frequência, e desta forma traçar o comparativo para demonstrar a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida em nosso trabalho.

Destacamos também, que quando efetuamos a análise de aspectos que afetam a localização de faltas, como faltas próximas a subestações e com ângulos de incidência próximo de zero, as respostas do programa FLATP foram satisfatórias.

Para encerrar as análises, foram simuladas faltas em diferentes posições da linha de transmissão *Areia- Ivaiporã*, demonstrando que mesmo utilizando-se dados de um único terminal, podemos com o programa obter resultados aceitáveis no sentido de identificação e localização de faltas.

No capítulo seguinte, serão feitas as considerações finais a respeito deste trabalho, como também sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 7

Conclusão

Dentro do novo ambiente no setor elétrico, em que a eficiência e a rapidez para produzir respostas e ações concretas são fundamentais para fazer frente aos problemas associados à qualidade de energia elétrica, procuramos através deste trabalho e no desenvolvimento do programa, estabelecer uma nova condição e perspectiva de análise, no sentido da avaliação de eventos ou transitórios eletromagnéticos de alta frequência, produzidos por faltas em sistemas de transmissão.

As ferramentas adotadas neste estudo, foram o programa de análise de transitórios *ATP* e seu editor gráfico *ATPDraw*, cuja estrutura e modelos utilizados para simulação, promoveram algumas observações importantes em termos de *softwares* dirigidos à simulação e a análise de transitórios em sistemas de potência. Isto propiciou o desenvolvimento de uma ferramenta própria, para a análise comparativa de transitórios, voltada principalmente a identificação e a localização de faltas em sistemas de transmissão EAT.

Foi durante o estágio de doutoramento junto à Universidade de Nottingham, Inglaterra, sob a orientação do Prof. David Thomas, que as avaliações realizadas em função de simulações no sistema *Scottish Power*, e também de estudos sobre a metodologia de estimação transitórios de tensão associados a faltas em sistemas de transmissão [16], baseada na teoria de ondas viajantes, deram o suporte necessário ao nosso trabalho.

Os aspectos teóricos das características das ondas viajantes geradas por faltas em linhas de transmissão, foram desta forma revistos, para embasar a aplicação do princípio da

localização de faltas em função da sucessiva identificação de sinais de alta frequência de tensão e corrente, que viajam e chegam aos barramentos de subestações, e onde em particular, o primeiro e o subsequente sinal, com referência ao primeiro sinal são utilizados e correlacionados para identificar a posição da falta.

A reunião de todos os conceitos teóricos e estudos de simulações, levaram ao desenvolvimento do programa *FLATP*, que trata-se de uma interface gráfica em ambiente MatlabTM, que alia o programa *ATP* e pode ser mais uma opção prática a engenheiros e técnicos de sistemas de potência, para avaliação de transitórios de ondas viajantes, devido a faltas em linhas de transmissão, como também auxiliar na localização destas.

O desempenho demonstrado por esse programa, aplicado ao sistema britânico *Scottish Power*, incentivou o estudo e a possibilidade de aplicação da teoria de ondas viajantes, bem como da metodologia de estimação de tensões transitórias, junto ao sistema de transmissão brasileiro da Eletrosul, algo que realmente não tinha sido utilizado pela empresa concessionária de energia.

Portanto, através da modelagem do sistema da Eletrosul e de várias simulações realizadas, observou-se que a metodologia empregada, bem como o programa desenvolvido para análise de transitórios possuem validade, como apresentados em [53] e [54], embora a aplicabilidade seja condicionada a registradores de sinais transitórios com uma taxa de amostragem superior aos atualmente empregados.

Assim, dentre os objetivos atingidos da proposta de doutoramento, ressaltamos que com base no encaminhamento proposto no projeto inicial de tese, e no que foi apresentado até aqui, colocamos com um dos objetivos principais, o estudo e a melhoria do desempenho de sistemas de energia através da localização de faltas, observando aspectos da monitoração da qualidade nestes sistemas, e também, o de se realizar avaliações de predição ou estimação estocástica, baseadas na metodologia apresentada em [16], na busca do melhor entendimento dos transitórios de alta frequência em sistemas de transmissão.

Portanto, atendendo as expectativas, que envolvem uma contribuição ao estudo da proteção de sistemas elétricos, foi possível o desenvolvimento de uma ferramenta prática para análise comparativa e interpretação de transitórios, com vistas a auxiliar na identificação e na localização de faltas em sistemas de transmissão. Podendo-se assim, estabelecerem-se condições na busca da estabilidade e da confiabilidade destes sistemas, frente aos problemas associados a faltas em linhas de transmissão e aos desafios impostos para viabilizar soluções eficazes e rápidas.

Outra questão relevante, é que essas análises podem levar ao desenvolvimento de novas técnicas de localização de faltas e de proteção ultra-rápida, tanto em sistemas de transmissão e talvez também em sistemas de distribuição, como vem sendo estudado em [55], sem contar nas informações que podem contribuir aos estudos de compatibilidade eletromagnética, segundo a resposta desses sistemas aos transitórios de alta frequência.

A seguir, são listadas as publicações e participações em eventos, durante o projeto de doutoramento.

7.1. Artigos Produzidos no Doutorado:

- **“Measurement of High Frequency Propagation and Coupling from Recorded Transients in EHV Substations”** D.W.P. Thomas, C. Christopoulos, Y. Tang, T.I.A.H. Mustafa and A. Raizer, Committee of the Cost Action 261 on Electromagnetic Compatibility in Complex and Distributed Systems, Budapeste/Hungria, Junho/2002.
- **“Application of the TLM Method to Simplified Modeling of Hysteresis”** S. H. L. Cabral, A. Raizer, L. H. Meyer and T. I. A. H. Mustafa, Resumo publicado em anais, cujo artigo completo foi apresentado no CEFC 2002, *The Tenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Perugia/Itália, Junho/2002.
- **“EHV High Frequency Transient Transmission in Substations”** D.W.P. Thomas, C. Christopoulos, T.I.A.H. Mustafa, Y. Tang and A. Raizer V Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo - CBMag 2002, Gramado/RS, Novembro/2002.
- **“Comparison of Simulated and Recorded Transients for Travelling Wave Fault Location”** T.I.A.H. Mustafa, D.W.P. Thomas, C. Christopoulos and A. Raizer *IEEE PowerTech 2003*, Bologna/Itália, Junho/2003.
- **“A Qualidade de Energia Frente a Compatibilidade Eletromagnética”** T.I.A.H. Mustafa e A. Raizer, artigo submetido ao Comitê Editorial da Revista IEEE América Latina, ISSN 1548-0992, Dezembro/2003.
- **“An Analysis Using Travelling Waves Transients in the Fault Location on Brazilian Power System”** T.I.A.H. Mustafa, A. Raizer, D.W.P. Thomas, C. Christopoulos and A. L. Duarte, IX SEPOPE 2004, *Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, Rio de Janeiro/RJ, Maio/2004.
- **“Analysis of High Frequency Travelling Waves to the Fault Location on Brazilian Power System”** T.I.A.H. Mustafa, A. Raizer, D.W.P. Thomas, C. Christopoulos and R. J. O. Carvalho, artigo aceito para apresentação no *EMC Europe 2004, International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Eindhoven/Holanda, Setembro/2004.

7.2. Sugestões para Futuros Trabalhos:

A principal sugestão para futuros trabalhos, seria a implementação de um algoritmo híbrido ao programa *FLATP*, que utilize a teoria de ondas viajantes conjuntamente com a medição de impedância. Pois uma vez que, a frequência dos sinais transitórios gerados por uma falta é inversamente proporcional à distância para a localização da falta, e portanto quando uma falta ocorre muito próxima do barramento da subestação, onde são postados os equipamentos de medição e proteção, a diferença de tempo entre a primeira frente de onda e as subsequentes reflexões torna-se muito pequena. Assim, os transdutores podem não ser capaz de registrar os sinais de alta frequência, e o algoritmo de ondas viajantes poderia falhar para detectar as reflexões.

Contudo, sabe-se que os esquemas de proteção baseados na medição de impedância atuam rapidamente na detecção de faltas próximas e também para faltas com ângulos de incidência muito pequenos, mas sua grande desvantagem é a dependência da configuração do sistema e da resistência de falta.

Assim, se utilizarmos um algoritmo de proteção, o qual faz uso de ambos algoritmos citados acima, seremos capazes de detectar todos os tipos de falta. Isto irá melhorar a confiabilidade dos esquemas de proteção, que poderiam operar com a informação de ondas viajantes, e tendo o algoritmo de impedância atuando na retaguarda, como um *backup*.

Outra sugestão seria a implementação de um transdutor baseado nas medições de quantidades de tensão e de corrente, ou somente de corrente, se consideramos que as magnitudes de tensão possam ser estimadas, conforme foi apresentado neste trabalho. Estes sinais passariam por um processador digital de sinais, um *DSP - Digital Signal Processor*, no qual um algoritmo multicanal seria utilizado para extrair a faixa desejada de componentes de frequência destes sinais, a partir de linhas sob falta.

Com isso, poderíamos mais uma vez aliar as facilidades oferecidas pelo programa *FLATP* e implementá-lo em conjunto a este transdutor, com a finalidade de projetar um protótipo de um equipamento localizador de faltas, levando em conta as considerações feitas com base na teoria de ondas viajantes. Assim, este equipamento poderia ser testado junto às subestações de EAT do sistema de transmissão brasileiro, no sentido de demonstrar a aplicabilidade de todo o estudo efetuado neste trabalho, da mesma forma com que foi realizado no sistema britânico durante o estágio de doutoramento.

Ainda neste contexto investigativo, teríamos como outra sugestão, o estudo e a análise do desempenho do programa *FLATP*, considerando configurações de circuito duplo de sistemas de transmissão, linhas com compensação série e a geração distribuída de energia, que visam a melhoria da capacidade de transmissão, a estabilidade e a confiabilidade de sistemas de transmissão.

Para concluir, entendemos que somente a contínua investigação de técnicas de localização de faltas e dos fatores que afetam a sua precisão, poderá produzir resultados cujas ações associadas reflitam diretamente na melhoria da qualidade de sistemas de energia elétrica.

**ANEXO 1 - NORMAS ASSOCIADAS À QUALIDADE DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Algumas Normas Associadas à Qualidade de Energia Elétrica:

- *WG-Document (Draft), Power Quality Indices and Objectives. CIGRE Working Group 36.07, Sep. 2001.*
- *Resolução nº 24, de 27 de janeiro de 2000 da ANEEL- Estabelece as disposições relativas a continuidade da distribuição de energia elétrica. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, nº 20-E, de 28 de janeiro de 2000, Seção 1, pág.23 a 26.*
- *Curva CBEMA- Computer Business Equipment Manufacturer's Association.*
- *IEEE Standard 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 1995.*
- *ANSI(American National Standards Institute) C84.1-1989, American National Standard for Electric Power Systems and Equipment – Voltage Ratings (60 Hz).*
- *ANSI/NFPA(National Fire Protection Association) 70-1993, National Electrical Code.*
- *ANSI/NFPA 75-1992, Protection of Electronic Computer/Data Processing Equipment.*
- *IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System.*
- *ANSI/NFPA 77-1988, Recommended Practice on Static Electricity.*
- *ANSI/NFPA 780-1992, Lightning Protection Code.*
- *IEEE Std C57.12.00-1987, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers (ANSI).*
- *IEEE Std C57.12.01-1989, IEEE Standard Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers Including Those with Solid Cast and/or Resin-Encapsulated Windings.*
- *IEEE Std C62.41-1991, IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits (ANSI).*
- *IEEE Std 142-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and commercial Power Systems (IEEE Green Book).*
- *IEEE Std 446-1987, IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications (IEEE Orange Book).*
- *Federal Information Processing Standards Publication 94: Guideline on Electrical Power for ADP Installations, Sept.21, 1983.*

**ANEXO 2 - PROPAGAÇÃO MODAL EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO TRANSPOSTAS**

Propagação Modal para uma Linha de Transmissão Trifásica Completamente Transposta:

Se assumimos que uma linha de transmissão é completamente transposta ao longo de todo seu comprimento, suas matrizes de impedância e condutância serão simétricas e representadas por:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix}$$

e

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_p & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_p & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_p \end{bmatrix}$$

onde o subscrito p é utilizado para impedância ou admitância própria e o subscrito m para impedância ou admitância mútua.

O produto $[P]=[Z].[Y]$ é representado por:

$$[P] = \begin{bmatrix} P_a & P_b & P_b \\ P_b & P_a & P_b \\ P_b & P_b & P_a \end{bmatrix}$$

onde

$$P_a = Y_p \cdot Z_p + 2 \cdot Z_m \cdot Y_m$$

$$P_b = Y_m \cdot Z_p + Z_m \cdot Y_m + Z_m \cdot Y_p$$

Assim $[P]=[P]^T$ e, portanto esperamos que $[S]=[Q]$.

As constantes de propagação modal são obtidas a partir da solução da equação:

$$[P] \cdot [S] = I \cdot [S] \quad (1)$$

Para soluções não-triviais, temos:

$$\begin{vmatrix} P_a - ? & P_b & P_b \\ P_b & P_a - I & P_b \\ P_b & P_b & P_a - ? \end{vmatrix} = 0$$

$$(P_a - ?)([P_a - ?]^2 - P_b^2) - 2.P_b(P_b[P_a - ?] - P_b^2) = 0$$

Esta expressão, pode ser reduzida como segue:

$$(P_a - ?)(P_a - ? - P_b)(P_a - ? + P_b) - 2.P_b^2(P_a - ? - P_b) = 0$$

$$(P_a - ? - P_b)([P_a - ?][P_a - ? + P_b] - 2.P_b^2) = 0$$

$$(P_a - ? - P_b)(P_a - ? + 2P_b)(P_a - ? - P_b) = 0$$

As raízes são então,

$$I_1 = P_a + 2P_b = (Z_p + 2Z_m)(Y_p - 2Y_m)$$

$$I_2 = I_3 = P_a - P_b = (Z_p - Z_m)(Y_p + Y_m)$$

As constantes de propagação são portanto,

$$g = \sqrt{I}$$

$$g_1 = \sqrt{(Z_p + 2Z_m)(Y_p - 2Y_m)}$$

$$g_2 = g_3 = \sqrt{(Z_p - Z_m)(Y_p + Y_m)}$$

Para uma linha de transmissão aérea típica, o modo 1 propaga-se a uma velocidade menor que a velocidade da luz, com alguma perda, enquanto que outros dois modos propagam-se a uma velocidade próxima a velocidade da luz.

Os autovetores podem ser calculados a partir de autovalores, e estes formarão as matrizes de transformação modal [S] e [Q].

Para o modo 1,

$$I_1 = P_a + 2P_b$$

Os elementos dos autovetores são linearmente dependentes, portanto iniciamos com:

$$S_1 = 1$$

Substituindo S_1 e λ_1 na equação (1), teremos duas equações simultâneas:

$$-2P_b + S_2P_b + S_3P_b = 0 \quad (2)$$

$$P_b - 2S_2P_b + S_3P_b = 0 \quad (3)$$

Subtraindo a equação (2) da equação (3), temos:

$$-3P_b + 3S_2P_b = 0$$

Assim,

$$S_2 = 1$$

E com as equações (2) ou (3) temos,

$$S_3 = 1$$

O autovetor ${}^1[S]$ para o autovalor I_1 será:

$$I_1 = P_a + 2P_b$$

$${}^1[S] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Substituindo os autovalores I_2 e I_3 na equação (1), teremos:

$${}^2S_1 + {}^2S_2 + {}^2S_3 = 0 \quad (4)$$

$${}^3S_1 + {}^3S_2 + {}^3S_3 = 0 \quad (5)$$

Para soluções independentes, os dois vetores devem ser ortogonais:

$${}^2 \begin{bmatrix} S \end{bmatrix}^T \cdot {}^3 \begin{bmatrix} S^* \end{bmatrix} = 0$$

E assim, temos:

$${}^2S_1 \cdot {}^3S_1^* + {}^2S_2 \cdot {}^3S_2^* + {}^2S_3 \cdot {}^3S_3^* = 0$$

Substituindo 2S_3 e 3S_3 das equações (4) e (5), teremos:

$${}^2S_1 \cdot (2 \cdot {}^3S_1 \cdot {}^3S_2^*) + {}^2S_2 \cdot (2 \cdot {}^3S_2 \cdot {}^3S_1^*) = 0 \quad (6)$$

As equações (4), (5) e (6) são somente as restrições na escolha dos autovetores, assim as soluções disponíveis são:

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[S]^{-1} = [Q]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3/2 & 0 & -3/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix}$$

ANEXO 3 - ESTRUTURA DA ENTRADA DE DADOS DO ATP

1.BEGIN NEW DATA CASE

2.C First of an arbitrary number of comment cards at start
 < < Etc... > >

C Last of an arbitrary number of comment cards at start

3.Special request cards (if any)

4.Miscellaneous data cards and extensions

5.TACS HYBRID or TACS STAND ALONE or MODELS

cards that define TACS or MODELS modeling :
 tranfer function blocks, integrators, etc...

BLANK card terminating all TACS data

```

--'
|
| present
| only
|=====> if
| TACS or MODELS
| usage
|
--'

```

6.Cards for linear and nonlinear branches, transformers and transmission lines

BLANK card ending all **BRANCH** cards

7.Cards for electric network switches

BLANK card ending all **SWITCH** cards

8.Source cards for the electrical network

BLANK card ending all **SOURCE** cards

9.Load flow cards for "FIX SOURCE" usage

10.Cards for over-riding the internally calculated initial conditions

11.Output variable specification cards

BLANK card ending all **OUTPUT** cards

12.cards for specifying type 1-10 EMTP source functions point by point



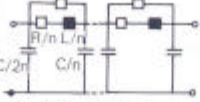
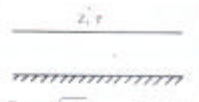


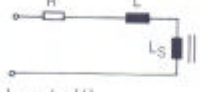





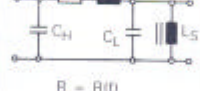
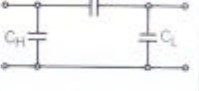


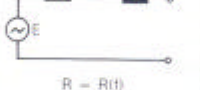
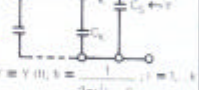




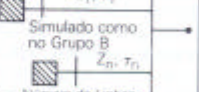


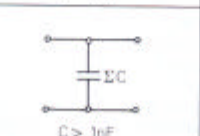
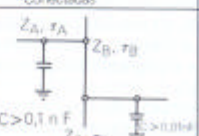
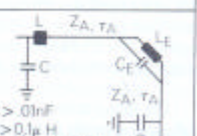





13.Batch-mode plotting cards








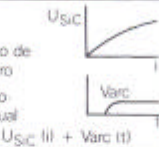
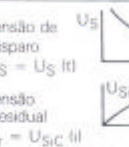
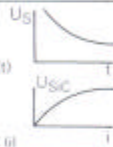

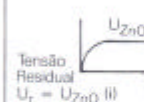
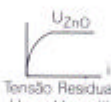
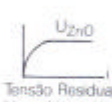





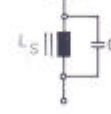
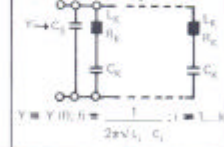



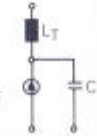



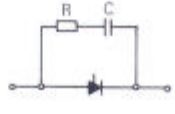
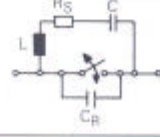
BLANK card ending all batch-mode **PLOT** cards

14.BEGIN NEW DATA CASE

BLANK

**ANEXO 4 – REPRESENTAÇÃO INDIVIDUAL DE COMPONENTES
DO SISTEMA PARA DIFERENTES FAIXAS DE FREQUÊNCIA**

Faixa de Frequência	A 0 ... 100 Hz	B 100 Hz ... 10 kHz	C 10 kHz ... 1 MHz	D 1 MHz ... 50 MHz
 Linhas		 $R = R(f), L = L(f)$	 $Z_0 = \sqrt{L/C} \quad r = r(f)$	 Simulação das Curvaturas
 Em Vazio Transformadores	 $L_S = L_S(\phi)$	 $R = R(f)$	 $Y = Y(f), h = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}}, f = f_0, k$	
 Em Carga	 $n = \frac{LV}{HV} \quad L_S = L_S(\phi)$	 $R = R(f)$		
 Geradores	Equações do Gerador Excitação Momento de Inércia Saturação	 $R = R(f)$	 $Y = Y(f), h = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_s}}, f = f_0, k$	
 Sistema de Alimentação Complexo		 $R = R(f)$	 Simulado como no Grupo B $n =$ Número de Linhas Conectadas	
 Subestações Secção de Barramento	Desprezível	 $C > 1nF$	 $C > 0,1 nF \quad r_C > 1,0 \mu H$	 $C > 0,1nF \quad L_e > 0,1\mu H$ L_e, C_e Simulação das Curvaturas
 Disjuntores = Chaves	 Chave Ideal	 Regiçãõ Estatística	 Decréscimo da Tensão de Suportabilidade c/o Tempo	 Decréscimo da Tensão da Suportabilidade c/o Tempo

Faixa de Frequência	A 0 ... 100 Hz	B 100 Hz ... 10 kHz	C 10 kHz ... 1 MHz	D 1 MHz ... 50 MHz ₂
 Disjuntores e Chaves Abertura	 Disjuntor Ideal ou Equação do Arco	 Disjuntor Ideal ou Equação do Arco	 Capacidade de Interrupção a Altas Frequências	 Capacidade de Interrupção a Altas Frequências
 Convencional SiC Para-raios	Tensão de Disparo Tensão Residual $U_r = U_{SiC}(I) + V_{arco}(I)$ 	Tensão de Disparo Tensão Residual $U_r = U_{SiC}(I) + V_{arco}(I)$ 	Tensão de Disparo $U_S = U_S(I)$ Tensão Residual $U_r = U_{SiC}(I)$ 	Tensão de Disparo $U_S = U_S(I)$ Tensão Residual $U_r = U_{SiC}(I)$ 
 ZnO	Tensão Residual $U_r = U_{ZnO}(I)$ 	Tensão Residual $U_r = U_{ZnO}(I)$ 	Tensão Residual $U_r = U_{ZnO}(I)$ 	Tensão de Disparo para Frentes Ingermes de Corrente  Tensão Residual $U_r = U_{ZnO}(I, t)$
 Transformadores de Potencial	 TP Indutivo $L_S = L_S / \phi $	Desprezível	Desprezível	
 Reatores	 $L_S = L_S / \phi $			
 Compensadores Estáticos		Geração de h Harmônicos $h = 2, \dots, 11$ 		Sem Interesse
 Retificadores				Sem Interesse

**ANEXO 5 - COMPRIMENTO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DOS
SISTEMAS TESTE.**

Linhas de Transmissão do Scottish Power 400 kV:

<i>Strathaven</i>	<i>Inverkip</i>	92.2 km
<i>Strathaven</i>	<i>Kilmarnoch</i>	35.3 km
<i>Strathaven</i>	<i>Harker</i>	125.2 km
<i>Kilmarnoch</i>	<i>Hunterston</i>	59.7 km
<i>Hunterston</i>	<i>Windy Hill</i>	50.9 km
<i>Hunterston</i>	<i>Neilston</i>	32.2 km
<i>Inverkip</i>	<i>Hunterston</i>	62.4 km
<i>Inverkip</i>	<i>Devol Moore</i>	30.3 km
<i>Devol Moore</i>	<i>Windy Hill</i>	28.7 km
<i>Inverkip</i>	<i>Neilston</i>	29.1 km

Linhas de Transmissão da Eletrosul 525 kV:

<i>Areia</i>	<i>Ivaiporã</i>	173.2 km
<i>Ivaiporã</i>	<i>Salto Santiago</i>	167 km
<i>Ivaiporã</i>	<i>Londrina</i>	120 km
<i>Salto Santiago</i>	<i>Itá</i>	186.8 km
<i>Salto Santiago</i>	<i>Segredo</i>	60.45 km
<i>Segredo</i>	<i>Areia</i>	56.7 km
<i>Campos Novos</i>	<i>Areia</i>	176.3 km
<i>Areia</i>	<i>Bateias</i>	220.3 km
<i>Areia</i>	<i>Curitiba</i>	235.2 km

ANEXO 6 – LISTAGEM DO PROGRAMA FLATP


```

%% Start the program
%%

[filename, pathname] = uigetfile('*.pl4, Pick a .pl4 file');

if isequal(filename,0) || isequal(pathname,0)
    disp('File not found')
else
    fi=filename;
    fid=fopen(fi,'r');
end

%% read the first line
%%

[date]=fscanf(fid,'%s',1);
[time]=fscanf(fid,'%s',1);
[busno]=fscanf(fid,'%d',1);
[vno]=fscanf(fid,'%d',1);
[outno]=fscanf(fid,'%d',1);
[tacsno]=fscanf(fid,'%d',1);
[num1]=fscanf(fid,'%d',1);
[num2]=fscanf(fid,'%s',1);

%% routine to position the next line in file
%%

while (1)
    ch=fread(fid,2);
    % if the character <CR> or <LF>
    if ((ch(1)==13)&(ch(2)==10));
        break
    end
end

%% read all tacsno
%%

cnames=[ ];
for i=1:tacsno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end

%% read all busno
%%

for i=1:busno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end
%display(cnames);

%% read all outno
%%

noo=fscanf(fid,'%d',outno);

%%

num=0;
nofilo=0; % to define options of outputs
for j=1:(vno/2)
    t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
    tt=(noo(2*j));
    num=j;
    if tt==0
        cellstring{num}=cnames(t,:);
    else
        str=strcat(cnames(t,:),'-',cnames(tt,:));
        cellstring{num}=str;
    end
    nofilo(j)=num;
    num=num+1;
end

ns1=0;

for nums1=1:3
    [s1,v1] = listdlg('PromptString','Select 3 Outputs of Voltage:....
        'SelectionMode','single','ListString',cellstring);
    ns1(nums1,1)=s1;
    leg1(nums1)=cellstring(s1);
end

sizes1=length(ns1);

```



```

%% Start the program
%%

[filename, pathname] = uigetfile('*.*.pl4', 'Pick a .pl4 file');

if isequal(filename,0) || isequal(pathname,0)
    disp('File not found')
else
    fi=filename;
    fid=fopen(fi,'r');
end

%% read the first line
%%

[date]=fscanf(fid,'%s',1);
[time]=fscanf(fid,'%s',1);
[busno]=fscanf(fid,'%d',1);
[vno]=fscanf(fid,'%d',1);
[outno]=fscanf(fid,'%d',1);
[tacsno]=fscanf(fid,'%d',1);
[num1]=fscanf(fid,'%d',1);
[num2]=fscanf(fid,'%s',1);

%% routine to position the next line in file
%%

while (1)
    ch=fread(fid,2);
    % if the character <CR> or <LF>
    if ((ch(1)==13)&(ch(2)==10));
        break
    end
end

%% read all tacsno
%%

cnames=[ ];
for i=1:tacsno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end

%% read all busno
%%

for i=1:busno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end
%display(cnames);

%% read all outno
%%

noo=fscanf(fid,'%d',outno);

%%

num=0;
nofilo=0; % to define options of outputs
for j=1:(vno/2)
    t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
    tt=(noo(2*j));
    num=j;
    num=num+1;
end

nu=num;

if vno<outno
    for j=((vno/2)+1):(outno/2)
        t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
        tt=(noo(2*j)+(tacsno-2));
        if tt==0
            cellstring{nu}=cnames(t,:);
        else
            str=strcat(cnames(t,:),'-',cnames(tt,:));
            cellstring{nu}=str;
        end
        nofilo(j)=nu;
        nu=nu+1;
    end
    %fprintf('nu= %d\n',nu);
    st={cellstring{num:(nu-1)}};
end

```



```

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% definition of the frequency %
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

prompt{1}='Frequency of the System: ';
title1= 'Set the frequency in Hz';
default_ans={'50'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
fr=answer;
frs=char(fr);
frd=str2num(frs);
timf=1/frd;

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% Initializing strings %
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

fi= [ ];
fi=strvcat(fi,blanks(15));
date= [ ];
date=strvcat(date,blanks(10));
time= [ ];
time=strvcat(time,blanks(10));

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% Start the program %
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

[filename, pathname] = uigetfile('*.pl4', 'Pick a .pl4 file');

if isequal(filename,0) || isequal(pathname,0)
    disp('File not found')
else
    fi=filename;
    fid=fopen(fi,'r');
end

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% read the first line %
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

[date]=fscanf(fid,'%s',1);
[time]=fscanf(fid,'%s',1);
[busno]=fscanf(fid,'%d',1);
[vno]=fscanf(fid,'%d',1);
[outno]=fscanf(fid,'%d',1);
[tacsno]=fscanf(fid,'%d',1);
[num1]=fscanf(fid,'%d',1);
[num2]=fscanf(fid,'%s',1);

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% routine to position the next line in file %
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

while (1)
    ch=fread(fid,2);
    % if the character <CR> or <LF>
    if ((ch(1)==13)&(ch(2)==10));
        break
    end
end

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% read all tacsno %
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

cnames= [ ];
for i=1:tacsno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% read all busno %
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

for i=1:busno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end
%display(cnames);

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% read all outno %
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

noo=fscanf(fid,'%d',outno);

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

num=0;
nofilo=0; % to define options of outputs
for j=1:(vno/2)

```

```

t=(noo(2*j - 1)+(tacsno-2));
tt=(noo(2*j));
num=j;
if tt==0
    cellstring{ num}=cnames(t,:);
else
    str=strcat(cnames(t,:),'-',cnames(tt,:));
    cellstring{ num}=str;
end
nofilo(j)=num;
num=num+1;
end

nu=num;

if vno<outno
    for j=(vno/2+1):(outno/2)
        t=(noo(2*j - 1)+(tacsno-2));
        tt=(noo(2*j)+(tacsno-2));
        if tt==0
            cellstring{ nu}=cnames(t,:);
        else
            str=strcat(cnames(t,:),'-',cnames(tt,:));
            cellstring{ nu}=str;
        end
        nofilo(j)=nu;
        nu=nu+1;
    end
    fprintf('nu= %d\n',nu);
    %st={cellstring{ num:(nu-1)}};

end

[s,v] = listdlg('PromptString','Select 3 Outputs for Incremental Values:',...
    'SelectionMode','multiple','ListString',cellstring);

value=[ ];
value=fscanf(fid,'%f',Inf);

tams=length(s);

if (tams~=3)& (tams~=0)
    errordlg('Invalid number of outputs, you need to select 3!', 'Error Dialog Box','modal');
    break
end

for is=1:tams
    [nofilo(is)]=s(is);
end

leg3=cellstring(s);

nn=(max(size(value))/(outno/2)+1);
out=[ ];
m=0;
for i=1:nn
    ti(i,1)=value(1+m);

    for is=1:tams
        out(i,is)=value(nofilo(is)+1+m);
    end

    m=m+((outno/2)+1);
end

% Sample time and time limits to incremental values
ta=0;

tmax=max(ti);

if tmax <= timf
    warndlg('You can not obtain the Incremental Values for this file .p14 !','Warning Dialog Box','modal');
    break
end

ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
pp=timf/ta;
q=round(pp);
e=max(size(ti));
cc=(e-q);

if (vno < outno)
    % m=0;
    while q < e
        m=0;
        for c=1:cc
            incti(c,1)=ti(q,1);

            for is=1:tams
                incout(c,is)=out(q,is)-out(1+m,is);
            end
            q=q+1;
            if m==cc
                break
            end
            m=m+1;
        end
    end
end
end

```



```

fi=strvcat(fi,blanks(15));
date=[];
date=strvcat(date,blanks(10));
time=[];
time=strvcat(time,blanks(10));

%%%%%%%%%%
% Start the program %
%%%%%%%%%%

[filename, pathname] = uigetfile('*.*pl4', 'Pick a .pl4 file');

if isequal(filename,0) || isequal(pathname,0)
    disp('File not found')
else
    fi=filename;
    fid=fopen(fi,'r');
end

%%%%%%%%%%
% read the first line %
%%%%%%%%%%

[date]=fscanf(fid,'%s',1);
[time]=fscanf(fid,'%s',1);
[busno]=fscanf(fid,'%d',1);
[vno]=fscanf(fid,'%d',1);
[outno]=fscanf(fid,'%d',1);
[tacsno]=fscanf(fid,'%d',1);
[num1]=fscanf(fid,'%d',1);
[num2]=fscanf(fid,'%s',1);

%%%%%%%%%%
% routine to position the next line in file %
%%%%%%%%%%

while (1)
    ch=fread(fid,2);
    % if the character <CR> or <LF>
    if ((ch(1)==13)&(ch(2)==10));
        break
    end
end

%%%%%%%%%%
% read all tacsno %
%%%%%%%%%%

cnames=[];
for i=1:tacsno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end

%%%%%%%%%%
% read all busno %
%%%%%%%%%%

for i=1:busno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end
%display(cnames);

%%%%%%%%%%
% read all outno %
%%%%%%%%%%

noo=fscanf(fid,'%d',outno);

%%%%%%%%%%

num=0;
nofilo=0; % to define options of outputs
for j=1:(vno/2)
    t=(noo(2*j - 1)+(tacsno-2));
    tt=(noo(2*j));
    num=j;
    if tt==0
        cellstring{num}=cnames(t,:);
    else
        str=strcat(cnames(t,:),'-',cnames(tt,:));
        cellstring{num}=str;
    end
    nofilo(j)=num;
    num=num+1;
end

nu=num;

if vno<outno
    for j=((vno/2)+1):(outno/2)
        t=(noo(2*j - 1)+(tacsno-2));
        tt=(noo(2*j)+(tacsno-2));

```

```

    if tt==0
        cellstring{nu}=cnames(t,:);
    else
        str=strcat(cnames(t,:),'- ' ,cnames(tt,:));
        cellstring{nu}=str;
    end
    nofilo(j)=nu;
    nu=nu+1;
end
%fprintf('nu= %d\n',nu);
%st={cellstring{num:(nu-1)}};

end

[s,v] = listdlg('PromptString','Select 3 Outputs for Modal Values:'....
    'SelectionMode','multiple','ListString',cellstring);

value=[];
value=fscanf(fid,'%f',Inf);

tams=length(s);

if (tams~=3)&(tams~=0)
    errordlg('Invalid number of outputs, you need to select 3 !','Error Dialog Box','modal');
    break
end

for is=1:tams
    [nofilo(is)]=s(is);
end

leg4=cellstring(s);

nn=(max(size(value))/(outno/2)+1);
out=[];
m=0;
for i=1:nn
    ti(i,1)=value(1+m);

    for is=1:tams
        out(i,is)=value(nofilo(is)+1+m);
    end

    m=m+(outno/2)+1;
end

% Sample time and time limits to incremental values

ta=0;

tmax=max(ti);

if tmax <= timf
    warndlg('You can not obtain the Modal Values for this file .pl4 !','Warning Dialog Box','modal');
    uiwait;
    uiresume;
end

ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
pp=timf/ta;
q=round(pp);
e=max(size(ti));
cc=(e-q);
%indt=0;

if (vno < outno)
    %m=0;
    while q < e
        m=0;
        for c=1:cc
            incti(c,1)=ti(q,1);

            for is=1:tams
                incout(c,is)=out(q,is)-out(1+m,is);
            end
            q=q+1;
            if m==cc
                break
            end
            m=m+1;
        end
    end
end

atpout(:,1)=incti;

% matrices defined for scottishpower systems
%tm=[1 1 1;1 0 -2;1 -1 1]

prompt{1}='Transformation Matrix: ';
title1='Set Transformation Matrix';
default_ans={'[1 1 1;1 0 -2;1 -1 1]'};

```



```

if isequal(filename,0)~=isequal(pathname,0)
    disp('File not found')
else
    fi=filename;
    fid=fopen(fi,'r');
end

%% read the first line
% read the first line
%%

[date]=fscanf(fid,'%s',1);
[time]=fscanf(fid,'%s',1);
[busno]=fscanf(fid,'%d',1);
[vno]=fscanf(fid,'%d',1);
[outno]=fscanf(fid,'%d',1);
[tacsno]=fscanf(fid,'%d',1);
[num1]=fscanf(fid,'%d',1);
[num2]=fscanf(fid,'%s',1);

%% routine to position the next line in file
% routine to position the next line in file
%%

while (1)
    ch=fread(fid,2);
    % if the character <CR> or <LF>
    if ((ch(1)==13)&(ch(2)==10));
        break
    end
end

% read all tacsno
% read all tacsno
%%

cnames=[ ];
for i=1:tacsno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end

% read all busno
% read all busno
%%

for i=1:busno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end

%display(cnames);

% read all outno
% read all outno
%%

noo=fscanf(fid,'%d',outno);

%%

num=0;
nofilo=0; % to define options of outputs
for j=1:(vno/2)
    t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
    tt=(noo(2*j));
    num=j;
    num=num+1;
end

nu=num;

if vno<outno
    for j=(vno/2+1):(outno/2)
        t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
        tt=(noo(2*j)+(tacsno-2));
        if tt==0
            cellstring{nu}=cnames(t,:);
        else
            str=strcat(cnames(t,:),'-',cnames(tt,:));
            cellstring{nu}=str;
        end
        nofilo(j)=nu;
        nu=nu+1;
    end
    %fprintf('nu= %d\n',nu);
    st={cellstring{num:(nu-1)}};
end

prompt{1}='Number of Lines at Substation: ';
title1='Set Number of Lines';
default_ans='4';
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
m=answer;

```

```

lin=char(m);
nlin=str2num(lin);

if (nlin>4)
    ButtonName=questdlg('The program was set for maximum 4 Lines, do you want reduce the number of lines?', ...
        'Warning Number lines', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        prompt{1}='Number of Lines at Substation: ';
        title1='Set Number of Lines';
        default_ans='4';
        answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
        m=answer;
        lin=char(m);
        nlin=str2num(lin);

    case 'NO',
        break
    end % switch

end

ButtonName=questdlg('Choose the display mode for the current outputs:', ...
    'Choose Phase or Modal Values', ...
    'Phase','Modal','Cancel','Cancel!');

switch ButtonName,
case 'Phase',

    ns2=0;

    for nums2=1:nlin
        [s2,v2] = listdlg('PromptString','Select 3 Outputs of Current',...
            'SelectionMode','single','ListString',st);
        ns2(nums2,1)=(s2+num -1);
        leg2(nums2)=cellstring(s2+num -1);
    end

    sizes2=length(ns2);

    value=[];
    value=fscanf(fid,'%f',Inf);

    for is2=1:sizes2
        [nofilo(is2)]=ns2(is2,1);
    end

    nn=(max(size(value))/(outno/2)+1);
    out=[];
    m=0;
    for i=1:nn
        ti(i,1)=value(1+m);

        for is2=1:sizes2
            out(i,is2)=value(nofilo(is2)+1+m);
        end

        m=m+((outno/2)+1);
    end

    atpout(:,1)=ti;

    for is2=1:sizes2
        atpout(:,is2+1)=out(:,is2);
        if nlin==1
            plot(ti,out(:,1));
            title('Current By Phase at Substation: ');
            xlabel('Time (s)');
            ylabel('Current(A)');
            legend(leg2,0);
            grid on;

            ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
                'Print The Figure', ...
                'YES','NO','NO');

            switch ButtonName,
            case 'YES',
                figure;
                plot(ti,out(:,1));
                title('Current By Phase at Substation: ');
                xlabel('Time (s)');
                ylabel('Current(A)');
                legend(leg2,0);
                grid on;
                break;

```

```

        case 'NO',
            break
        end % switch

end
if nlin==2
plot(ti,out(:,1),'-'.ti,out(:,2),'-');
title ('Currents By Phase at Substation: ');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Current(A)');
legend(leg2,0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
    'Print The Figure', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
figure;
plot(ti,out(:,1),'-'.ti,out(:,2),'-');
title ('Currents By Phase at Substation: ');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Current(A)');
legend(leg2,0);
grid on;
break

case 'NO',
break
end % switch

end
if nlin==3
plot(ti,out(:,1),'-'.ti,out(:,2),'-'.ti,out(:,3),'-');
title ('Currents By Phase at Substation: ');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Current(A)');
legend(leg2,0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
    'Print The Figure', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
figure;
plot(ti,out(:,1),'-'.ti,out(:,2),'-'.ti,out(:,3),'-');
title ('Currents By Phase at Substation: ');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Current(A)');
legend(leg2,0);
grid on;
break

case 'NO',
break
end % switch

end
if nlin==4
plot(ti,out(:,1),'-'.ti,out(:,2),'-'.ti,out(:,3),'-'.ti,out(:,4),'-');
title ('Currents By Phase at Substation: ');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Current(A)');
legend(leg2,0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
    'Print The Figure', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
figure;
plot(ti,out(:,1),'-'.ti,out(:,2),'-'.ti,out(:,3),'-'.ti,out(:,4),'-');
title ('Currents By Phase at Substation: ');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Current(A)');
legend(leg2,0);
grid on;
break

case 'NO',
break
end % switch
end

end

case 'Modal',

% matrices defined for scottishpower systems

```

```

prompt{1}='Transformation Matrix: ';
title1= 'Set Transformation Matrix';
default_ans={'[1 1 1;1 0 -2;1 -1 1]'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
m=answer;
t=char(m);
tm=str2num(t);

mod0line=[ ];
mod1line=[ ];
mod2line=[ ];

value=[ ];
value=fscanf(fid,'%f',Inf);

for kk=1:nlin
    is=0;
    ns=[ ];
    ti=[ ];
    incti=[ ];
    timdl=[ ];
    out=[ ];
    incout=[ ];
    nofilo=[ ];

    if kk==1
        msgbox('Now! Choose the phases of First line.','First Line');
        uiwait;
    end

    if kk==2
        msgbox('Now! Choose the phases of second line.','Second Line');
        uiwait;
    end

    if kk==3
        msgbox('Now! Choose the phases of third line.','Third Line');
        uiwait;
    end

    if kk==4
        msgbox('Now! Choose the phases of fourth line.','Fourth Line');
        uiwait;
    end

    for num s=1:3

        [s,v] = listdlg('PromptString','Select the phases of Lines:','...
        'SelectionMode','single','ListString',st);
        ns(nums,1)=(s+num -1);
        leg4(nums)=cellstring(s+num -1);

    end

    % value=[ ];
    % value=fscanf(fid,'%f',Inf)

    tams=length(ns);

    for is=1:tams
        [nofilo(is)]=ns(is);
    end

    nn=(max(size(value))/(outno/2)+1);

    m=0;
    for i=1:nn
        ti(i,1)=value(1+m);

        if (ti(i,1)==0.0001)
            tct=i;
        end

        for is=1:tams
            out(i,is)=value(nofilo(is)+1+m);
        end

        m=m+((outno/2)+1);
    end

    ButtonName=questdlg('Do you want to use the currents on Current Transducers?', ...
    'Current Transducers', ...
    'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
        case 'YES',

```

```

%tii=ti
vi1=out(:,1);
vi2=out(:,2);
vi3=out(:,3);

assignin('base','tct',tct);
assignin('base','nn',nn);
assignin('base','tii',tii);
assignin('base','vi1',vi1);
assignin('base','vi2',vi2);
assignin('base','vi3',vi3);

%tt1=size(ti)
%tt2=size(vi1)

ct3in;
sim ct3in;

%tt3=size(tout);
%tt4=size(output);
%tt5=size(output1)
%tt6=size(output2)

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure with the currents on Current Transducers?', ...
    'Current Transducers', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
    figure;

    for r=1:tct
        output(r)=0.000;
        output1(r)=0.000;
        output2(r)=0.000;
    end

    plot(tout,output,'-',tout,output1,'--',tout,output2,'-.');

    title('Currents on CT Substation Circuit');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('leg4,0);
    grid on;
    uiwait;

case 'NO',
    %break
end % switch

ti=[tout];

out=[output,output1,output2];

% Sample time and time limits to incremental values

ta=0;

tmax=max(ti);

if tmax <= timf
    warndlg('You can not obtain the Modal Values for this file .pl4 !','Warning Dialog Box','modal');
    uiwait;
    uiresume;
end

ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
pp=timf/ta;
q=round(pp);
e=max(size(ti));
cc=(e-q);

% Sample time and time limits to incremental values
% ta=0;

% tmax=max(ti);

% if tmax <= 0.020
% warndlg('You can not obtain the Modal Values for this file .pl4 !','Warning Dialog Box','modal');
% uiwait;
% uiresume;
% end

% ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
% pp=0.020/ta;
% q=round(pp);
% e=max(size(ti));
% cc=(e-q);

if (vno < outno)
    %m=0;

```

```

while q < e
m=0;
for c=1:cc
    incti(c,1)=ti(q,1);

    for is=1:tams
        incout(c,is)=out(q,is)-out(1+m,is);
    end
    q=q+1;
    if m==cc
        break
    end
    m=m+1;
end
end

atpout(:,1)=incti;

timdl=ti(1:cc);

for r=1:tct
    incout(r,1)=0.000;
    incout(r,2)=0.000;
    incout(r,3)=0.000;
end

valuephase=[incout(:,1),incout(:,2),incout(:,3)];

valuemode=inv(tm)*valuephase';

mod0line(kk,:)=valuemode(1,:);
mod1line(kk,:)=valuemode(2,:);
mod2line(kk,:)=valuemode(3,:);

end

case 'NO',

% Sample time and time limits to incremental values
ta=0;

tmax=max(ti);

if tmax <= 0.020
    warndlg('You can not obtain the Modal Values for this file .pl4 !','Warning Dialog Box','modal');
    uiwait;
    uiresume;
end

ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
pp=0.020/ta;
q=round(pp);
e=max(size(ti));
cc=(e-q);

if (vno < outno)
    %m=0;
    while q < e
        m=0;
        for c=1:cc
            incti(c,1)=ti(q,1);

            for is=1:tams
                incout(c,is)=out(q,is)-out(1+m,is);
            end
            q=q+1;
            if m==cc
                break
            end
            m=m+1;
        end
        end

        atpout(:,1)=incti;

        timdl=ti(1:cc);
        valuephase=[incout(:,1),incout(:,2),incout(:,3)];

        valuemode=inv(tm)*valuephase';
        mod0line(kk,:)=valuemode(1,:);
        mod1line(kk,:)=valuemode(2,:);
        mod2line(kk,:)=valuemode(3,:);
    end
    % break
end % switch

end

ButtonName=questdlg('Do you want to plot Modes 0 ?, ...
    Plot Modes 0?, ...
    'YES','NO','NO');

```

```

switch ButtonName,
case 'YES',

if kk==1
plot(timdl,mod0line(1,1:cc),'-');
title('Mode 0 of Line 1');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 0 Line1',0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
'Print The Figure', ...
'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',

figure;
plot(timdl,mod0line(1,1:cc),'-');
title('Modes 0 of Line 1');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 0 Line1',0);
grid on;
uiwait;
%break

case 'NO',
%break
end % switch
end

if kk==2
plot(timdl,mod0line(1,1:cc),'-',timdl,mod0line(2,1:cc),'--');
title('Modes 0 of Lines 1 and 2');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 0 Line1','Mode 0 Line2',0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
'Print The Figure', ...
'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
figure;
plot(timdl,mod0line(1,1:cc),'-',timdl,mod0line(2,1:cc),'--');
title('Modes 0 of Lines 1 and 2');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 0 Line1','Mode 0 Line2',0);
grid on;
uiwait;
%break

case 'NO',
%break
end % switch

end

if kk==3
plot(timdl,mod0line(1,1:cc),'-',timdl,mod0line(2,1:cc),'--',timdl,mod0line(3,1:cc),'-');
title('Modes 0 of Lines 1, 2 and 3');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 0 Line1','Mode 0 Line2','Mode 0 Line3',0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
'Print The Figure', ...
'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
figure;
plot(timdl,mod0line(1,1:cc),'-',timdl,mod0line(2,1:cc),'--',timdl,mod0line(3,1:cc),'-');
title('Modes 0 of Lines 1, 2 and 3');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 0 Line1','Mode 0 Line2','Mode 0 Line3',0);
grid on;
uiwait;
%break

case 'NO',
%break
end % switch

end

```

```

if kk==4
    plot(timdl.mod0line(1,1:cc),'-',timdl.mod0line(2,1:cc),'--',timdl.mod0line(3,1:cc),'-.',timdl.mod0line(4,1:cc),'');
    title('Modes 0 of Lines 1, 2, 3 and 4');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('Mode 0 Line1','Mode 0 Line2','Mode 0 Line3',' Mode 0 Line4', 0);
    grid on;

    ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
        'Print The Figure', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        figure;
        plot(timdl.mod0line(1,1:cc),'-',timdl.mod0line(2,1:cc),'--',timdl.mod0line(3,1:cc),'-.',timdl.mod0line(4,1:cc),'');
        title('Modes 0 of Lines 1, 2, 3 and 4');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Amplitude');
        legend('Mode 0 Line1','Mode 0 Line2','Mode 0 Line3','Mode 0 Line4', 0);
        grid on;
        uiwait;
        %break
    case 'NO',
        %break
    end % switch

end

%break

case 'NO',
    %break
end % switch

close (figure);

ButtonName=questdlg('Do you want to plot Modes 1 ?', ...
    'Plot Modes 1:', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',

    if kk==1
        plot(timdl.mod1line(1,1:cc),'-');
        title('Mode 1 of Line 1 ');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Amplitude');
        legend('Mode 1 Line1',0);
        grid on;

        ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
            'Print The Figure', ...
            'YES','NO','NO');

        switch ButtonName,
        case 'YES',
            figure;
            plot(timdl.mod1line(1,1:cc),'-');
            title('Modes 1 of Line 1 ');
            xlabel('Time (s)');
            ylabel('Current');
            legend('Mode 1 Line1',0);
            grid on;
            uiwait;
            %break

        case 'NO',
            %break
        end % switch
    end

    if kk==2
        plot(timdl.mod1line(1,1:cc),'-',timdl.mod1line(2,1:cc),'--');
        title('Modes 1 of Lines 1 and 2');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Amplitude');
        legend('Mode 1 Line1','Mode 1 Line2',0);
        grid on;

        ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
            'Print The Figure', ...
            'YES','NO','NO');

        switch ButtonName,
        case 'YES',
            figure;
            plot(timdl.mod1line(1,1:cc),'-',timdl.mod1line(2,1:cc),'--');

```



```

        title ('Modes 1 of Lines 1 and 2');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Current');
        legend('Mode 1 Line1','Mode 1 Line2',0);
        grid on;
        uiwait;
        %break

    case 'NO',
        %break
    end % switch

end

if kk==3
    plot(timdl,mod1line(1,1:cc),'-',timdl,mod1line(2,1:cc),'--',timdl,mod1line(3,1:cc),'-.');
    title ('Modes 1 of Lines 1, 2 and 3');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('Mode 1 Line1','Mode 1 Line2','Mode 1 Line3',0);
    grid on;

    ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
        'Print The Figure', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
        case 'YES',
            figure;
            plot(timdl,mod1line(1,1:cc),'-',timdl,mod1line(2,1:cc),'--',timdl,mod1line(3,1:cc),'-.');
            title ('Modes 1 of Lines 1, 2 and 3');
            xlabel('Time (s)');
            ylabel('Current');
            legend('Mode 1 Line1','Mode 1 Line2','Mode 1 Line3',0);
            grid on;
            uiwait;
            %break

        case 'NO',
            %break
    end % switch

end

if kk==4
    plot(timdl,mod1line(1,1:cc),'-',timdl,mod1line(2,1:cc),'--',timdl,mod1line(3,1:cc),'-.',timdl,mod1line(4,1:cc),'');
    title ('Modes 1 of Lines 1, 2, 3 and 4');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('Mode 1 Line1','Mode 1 Line2','Mode 1 Line3','Mode 1 Line4', 0);
    grid on;

    ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
        'Print The Figure', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
        case 'YES',
            figure;
            plot(timdl,mod1line(1,1:cc),'-',timdl,mod1line(2,1:cc),'--',timdl,mod1line(3,1:cc),'-.',timdl,mod1line(4,1:cc),'');
            title ('Modes 1 of Lines 1, 2, 3 and 4');
            xlabel('Time (s)');
            ylabel('Current');
            legend('Mode 1 Line1','Mode 1 Line2','Mode 1 Line3','Mode 1 Line4', 0);
            grid on;
            uiwait;
            %break

        case 'NO',
            %break
    end % switch

end

%break

case 'NO',
    %break
end % switch

close(figure);

ButtonName=questdlg('Do you want to plot Modes 2 ?', ...
    'Plot Modes 2:', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
    case 'YES',

        if kk==1
            plot(timdl,mod2line(1,1:cc),'-');
            title ('Mode 2 of Line 1 ');
            xlabel('Time (s)');

```

```

ylabel('Amplitude');
legend('Mode 2 Line1',0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
    'Print The Figure', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
    figure;
    plot(timdl,mod2line(1,1:cc),'-');
    title('Modes 2 of Line 1 ');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('Mode 2 Line1',0);
    grid on;
    break
case 'NO',
    break
end % switch
end

if kk==2
plot(timdl,mod2line(1,1:cc),'-',timdl,mod2line(2,1:cc),'-');
title('Modes 2 of Lines 1 and 2');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 2 Line1','Mode 2 Line2',0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
    'Print The Figure', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
    figure;
    plot(timdl,mod2line(1,1:cc),'-',timdl,mod2line(2,1:cc),'-');
    title('Modes 2 of Lines 1 and 2');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('Mode 2 Line1','Mode 2 Line2',0);
    grid on;
    break
case 'NO',
    break
end % switch

end

if kk==3
plot(timdl,mod2line(1,1:cc),'-',timdl,mod2line(2,1:cc),'-',timdl,mod2line(3,1:cc),'-');
title('Modes 2 of Lines 1, 2 and 3');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 2 Line1','Mode 2 Line2','Mode 2 Line3',0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
    'Print The Figure', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
    figure;
    plot(timdl,mod2line(1,1:cc),'-',timdl,mod2line(2,1:cc),'-',timdl,mod2line(3,1:cc),'-');
    title('Modes 2 of Lines 1, 2 and 3');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('Mode 2 Line1','Mode 2 Line2','Mode 2 Line3',0);
    grid on;
    break
case 'NO',
    break
end % switch

end

if kk==4
plot(timdl,mod2line(1,1:cc),'-',timdl,mod2line(2,1:cc),'-',timdl,mod2line(3,1:cc),'-',timdl,mod2line(4,1:cc),'-');
title('Modes 2 of Lines 1, 2, 3 and 4');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
legend('Mode 2 Line1','Mode 2 Line2','Mode 2 Line3','Mode 2 Line4', 0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
    'Print The Figure', ...
    'YES','NO','NO');

```

```

switch ButtonName,
case 'YES',
    figure;
    plot(timdl.mod2line(1,1:cc),'-',timdl.mod2line(2,1:cc),'--',timdl.mod2line(3,1:cc),'-.',timdl.mod2line(4,1:cc),'*');
    title('Modes 2 of Lines 1, 2, 3 and 4');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('Mode 2 Line1','Mode 2 Line2','Mode 2 Line3','Mode 2 Line4', 0);
    grid on;
    break
case 'NO',
    break
end % switch

end

break

case 'NO',
    %break
end % switch

case 'Cancel',
    break
end % switch

```

```

% -----
function varargout = pushbutton8_Callback(h, eventdata, handles, varargin)

```

```

ButtonName=questdlg('Now you can to estimate the voltages at substation, using healthy lines. Do you want ?, ...
    'Estimated Voltages', ...
    'Yes','No','No');

```

```

switch ButtonName,
case 'Yes',

    %%%%%%%%%%%
    % Initializing variables and parameters in MATLAB; %
    %%%%%%%%%%%

    clear
    clc

    busno=0;
    vno=0;
    outno=0;
    tacsno=0;
    num1=0;
    num2=0;
    x=1:1:300;
    noo=zeros(size(x));
    nofils=0;

    %%%%%%%%%%%
    % Initializing strings %
    %%%%%%%%%%%

    fi=[];
    fi=strvcat(fi,blanks(15));
    date=[];
    date=strvcat(date,blanks(10));
    time=[];
    time=strvcat(time,blanks(10));

    %%%%%%%%%%%
    % Start the program %
    %%%%%%%%%%%

    [filename, pathname] = uigetfile('*.*', 'Pick a .pl4 file');

    if isequal(filename,0) || isequal(pathname,0)
        disp('File not found')
    else
        fi=filename;
        fid=fopen(fi,'r');
    end

    %%%%%%%%%%%
    % read the first line %
    %%%%%%%%%%%

    [date]=fscanf(fid,'%s',1);
    [time]=fscanf(fid,'%s',1);
    [busno]=fscanf(fid,'%d',1);
    [vno]=fscanf(fid,'%d',1);

```

```

[outno]=fscanf(fid,'%d',1);
[tacsno]=fscanf(fid,'%d',1);
[num1]=fscanf(fid,'%d',1);
[num2]=fscanf(fid,'%s',1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% routine to position the next line in file %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

while (1)
    ch=fread(fid,2);
    % if the character <CR> or <LF>
    if ((ch(1)==13)&(ch(2)==10));
        break
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% read all tacsno %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cnames=[];
for i=1:tacsno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% read all busno %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:busno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end
%display(cnames);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% read all outno %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

noo=fscanf(fid,'%d',outno);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

num=0;
nofilo=0; % to define options of outputs
for j=1:(vno/2)
    t=(noo(2^j)-1)+(tacsno-2);
    tt=(noo(2^j));
    num=j;
    num=num+1;
end

nu=num;

if vno<outno
    for j=((vno/2)+1):(outno/2)
        t=(noo(2^j)-1)+(tacsno-2);
        tt=(noo(2^j)+(tacsno-2));
        if tt==0
            cellstring{nu}=cnames(t,:);
        else
            str=strcat(cnames(t,:),'- ',cnames(tt,:));
            cellstring{nu}=str;
        end
        nofilo(j)=nu;
        nu=nu+1;
    end
    %fprintf('nu= %d\n',nu);
    st={cellstring{num:(nu-1)}};
end

prompt{1}='Number of Healthy Lines at Substation: ';
title1='Set Number of Healthy Lines';
default_ans='3';
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
m=answer;
lin=char(m);
nlin=str2num(lin);

if (nlin>3)
    ButtonName=questdlg('The program was set for maximum 3 Healthy Lines, do you want reduce the number of lines?', ...
        'Warming Number Healthy lines', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
        case 'YES',
            prompt{1}='Number of Healthy Lines at Substation: ';
            title1='Set Number of Healthy Lines';
            default_ans='3';
            answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
            m=answer;

```

```

lin=char(m);
nlin=str2num(lin);

case 'NO',
break
end % switch

end

% matrices defined for scottishpower systems

prompt{1}='Transformation Matrix: ';
title1= 'Set Transformation Matrix';
default_ans={'[1 1 1;1 0 -2;1 -1 1]'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
m=answer;
t=char(m);
tm=str2num(t);

prompt{1}='Zmode Matrix: ';
title1= 'Set Zmode Matrix';
default_ans={'[540 0 0;0 262 0;0 0 262]'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
y=answer;
z=char(y);
zm=str2num(z);

estvoltmod0=[ ];
estvoltmod1=[ ];
estvoltmod2=[ ];

value=[ ];
value=fscanf(fid,'%f',Inf);

for kk=1:nlin

is=0;
ns=[ ];
ti=[ ];
incti=[ ];
timdl=[ ];
out=[ ];
incout=[ ];
nofilo=[ ];

if kk==1
msgbox('Now! Choose the phases of first healthy line.','First Line');
uiwait;
end

if kk==2
msgbox('Now! Choose the phases of second healthy line.','Second Line');
uiwait;
end

if kk==3
msgbox('Now! Choose the phases of third healthy line.','Third Line');
uiwait;
end

for nums=1:3

[s,v] = listdlg('PromptString','Select the phases of Healthy Lines:','...
'SelectionMode','single','ListString',st);
ns(nums,1)=(s+num - 1);
leg4(nums)=cellstring(s+num - 1);

end

tams=length(ns);

for is=1:tams
[nofilo(is)]=ns(is);
end

nn=(max(size(value))/(outno/2)+1);

m=0;
for i=1:nn
ti(i,1)=value(1+m);

for is=1:tams

```

```

        out(i,is)=value(nofilo(is)+1+m);
    end

    m=m+((outno/2)+1);
end

% Sample time and time limits to incremental values
ta=0;

tmax=max(ti);

if tmax <= 0.020
    warndlg('You can not obtain the Modal Values for this file .pl4 !','Warning Dialog Box','modal');
    uiwait;
    uiresume;
end

ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
pp=0.020/ta;
q=round(pp);
e=max(size(ti));
cc=(e-q);

if (vno < outno)
    %m=0;
    while q < e
        m=0;
        for c=1:cc
            incti(c,1)=ti(q,1);

            for is=1:tams
                incout(c,is)=out(q,is)-out(1+m,is);
            end
            q=q+1;
            if m==cc
                break
            end
            m=m+1;
        end
    end

    atpout(:,1)=incti;

    timdl=ti(1:cc);
    valuephase=[incout(:,1),incout(:,2),incout(:,3)];
    valuemode=inv(tm)*valuephase';
    valuemodest=zm*valuemode;

    estvoltmod0(kk,:)=valuemodest(1,:);
    estvoltmod1(kk,:)=valuemodest(2,:);
    estvoltmod2(kk,:)=valuemodest(3,:);

    ButtonName=questdlg('Do you want to plot modes of estimated voltages using this line ?, ...
        'Plot Modes of Estimated Voltages:', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        plot(timdl,estvoltmod0(kk,:),'-',timdl,estvoltmod1(kk,:),'--',timdl,estvoltmod2(kk,:),'-.');
        title('Modes 0, 1 and 2 of Healthy Line');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Amplitude');
        legend('leg4,0');
        grid on;

        ButtonName=questdlg('Do you want create a figure to print?', ...
            'Print The Figure', ...
            'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        figure;
        plot(timdl,estvoltmod0(kk,:),'-',timdl,estvoltmod1(kk,:),'--',timdl,estvoltmod2(kk,:),'-.');
        title('Modes 0, 1 and 2 of Healthy Line');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Amplitude');
        legend('leg4,0');
        grid on;
        uiwait;
        %break

    case 'NO',
        %break

    end % switch

case 'NO',
    %break
end % switch

```



```

%%%%%%%%%%
% read all busno
%%%%%%%%%%

for i=1:busno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end
%display(cnames);

%%%%%%%%%%
% read all outno
%%%%%%%%%%

noo=fscanf(fid,'%d',outno);

%%%%%%%%%%

num=0;
nofilo=0; % to define options of outputs
for j=1:(vno/2)
    t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
    tt=(noo(2*j));
    num=j;
    num=num+1;
end

nu=num;

if vno<outno
    for j=((vno/2)+1):(outno/2)
        t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
        tt=(noo(2*j)+(tacsno-2));
        if tt==0
            cellstring{nu}=cnames(t,:);
        else
            str=strcat(cnames(t,:),'- ',cnames(tt,:));
            cellstring{nu}=str;
        end
        nofilo(j)=nu;
        nu=num+1;
    end
    %fprintf('nu= %d\n',nu);
    st={cellstring{num:(nu-1)}};
end

% matrices defined for scottishpower systems

prompt{1}='Transformation Matrix: ';
title1='Set Transformation Matrix';
default_ans={['1 1 1;1 0 -2;1 -1 1']};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
m=answer;
t=char(m);
tm=str2num(t);

prompt{1}='Zmode Matrix: ';
title1='Set Zmode Matrix';
default_ans={['540 0 0;0 262 0;0 0 262']};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
y=answer;
z=char(y);
zm=str2num(z);

prompt{1}='Initial Time of Cross-Correlation: ';
title1='Set Initial Time of Cross-Correlation (CC)';
default_ans={'0.02027'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
it=answer;
itc=char(it);
itcc=str2num(itc);

prompt{1}='Number of Samples in Window: ';
title1='Set Number of Samples in Window for CC';
default_ans={'8'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
ns=answer;
nsw=char(ns);
nswcc=str2num(nsw);

estvoltmod0=[ ];
estvoltmod1=[ ];
estvoltmod2=[ ];

value=[ ];
value=fscanf(fid,'%f',Inf);

```



```

for kk=1:2

is=0;
ns=[ ];
ti=[ ];
incti=[ ];
timdl=[ ];
out=[ ];
incout=[ ];
nofilo=[ ];

if kk==1
    msgbox(' Now! Define the phases of a healthy line, that will be used          to calculate S1 .' , 'Healthy Line');
    uiwait;
end

if kk==2
    msgbox(' Now! Define the phases of faulted line, that will be used          to calculate S2 .' , 'Faulted Line');
    uiwait;
end

for nums=1:3

    [s,v] = listdlg('PromptString','Select the Phases of Line:',...
        'SelectionMode','single','ListString',st);
    ns(nums,1)=(s+num -1);
    leg4(nums)=cellstr(s+num -1);

end

tams=length(ns);

for is=1:tams
    [nofilo(is)]=ns(is);
end

nn=[ ];

nn=(max(size(value))/(outno/2)+1);

m=0;
for i=1:nn
    ti(i,1)=value(1+m);

    if (ti(i,1)==0.0001)
        tct=i;
    end

    for is=1:tams
        out(i,is)=value(nofilo(is)+1+m);
    end

    m=m+((outno/2)+1);
end

m=0;

ButtonName=questdlg('Do you want to use the currents on Current Transducers?', ...
    'Current Transducers', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',

    %tii=ti
    vi1=out(:,1);
    vi2=out(:,2);
    vi3=out(:,3);

    assignin('base','nn',nn);
    assignin('base','ti',ti);
    assignin('base','vi1',vi1);
    assignin('base','vi2',vi2);
    assignin('base','vi3',vi3);

    ct3in;
    sim ct3in;

    ButtonName=questdlg('Do you want create a figure with the currents on Current Transducers?', ...
        'Current Transducers', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',

```

```

figure;

for r=1:tct
    output(r)=0.000;
    output1(r)=0.000;
    output2(r)=0.000;
end

plot(tout,output,'-',tout,output1,'--',tout,output2,'-.');
title('Currents on CT Substation Circuit');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Current');

legend('leg4,0');
grid on;
uiwait;

case 'NO',
    %break
end % switch

ti=tout;
out={output,output1,output2};

case 'NO',
    %break
end % switch

% Sample time and time limits to incremental values
ta=0;

%tim=size(ti)

tmax=max(ti);

if tmax <= 0.020
    warndlg('You can not obtain the Modal Values for this file .pl4 !','Warning Dialog Box','modal');
    uiwait;
    uiresume;
end

ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
pp=0.020/ta;
q=round(pp);
e=max(size(ti));
cc=(e-q);
indt=0;

if (vno < outno)
    %m=0;
    while q < e
        m=0;
        for c=1:cc
            incti(c,1)=ti(q,1);
            %%%%%%%%%%%
            if (incti(c,1)==itcc)
                tcr=c;
            end
            %%%%%%%%%%%

            for is=1:tams
                incout(c,is)=out(q,is)-out(1+m,is);
            end

            q=q+1;
            if m==cc
                break
            end
            m=m+1;
        end
    end
    atpout(:,1)=incti;
    timdl=ti(1:cc);

    for r=1:tct
        incout(r,1)=0.000;
        incout(r,2)=0.000;
        incout(r,3)=0.000;
    end

    valuephase=[incout(:,1),incout(:,2),incout(:,3)];

    if kk==1

        valuemode=inv(tm)*valuephase';
        valuemodest=zm*valuemode;
        %%%%%%%%%%%
        % figure:
        % plot(timdl,valuemodest);
        % grid on;

```



```

ylabel('Amplitude');
%legend('Mode 0','Mode 1','Mode 2', 0);
grid on;

ButtonName=questdlg('Do you want to create a figure to print?', ...
    'Print The Figure', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
    figure;
    plot(timdl(1:cc),s1(ntmc,:));
    title('Plot of Incident Voltage Waveform (S1) at Substation');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    %legend('Mode 1',0);
    grid on;
    uiwait;
    %break

case 'NO',
    %break
end % switch

case 'NO',
    %break
end % switch

ButtonName=questdlg('Do you want plot of reflected voltage waveform (S2) ?', ...
    'Plot S2:', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
    plot(timdl(1:cc),s2(ntmc,:));
    title('Plot of Reflected Voltage Waveform (S2) at Substation');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    %legend('Mode 0','Mode 1','Mode 2',0);
    grid on;

    ButtonName=questdlg('Do you want to create a figure to print?', ...
        'Print The Figure', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        figure;
        plot(timdl(1:cc),s2(ntmc,:));
        title('Plot of Reflected Voltage Waveform (S2) at Substation');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Amplitude');
        %legend('Mode 1',0);
        grid on;
        uiwait;
        %break

    case 'NO',
        %break
    end % switch

case 'NO',
    %break
end % switch

ButtonName=questdlg('Do you want plot both S1 and s2 ?', ...
    'Plot S1 and S2:', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
    plot(timdl(1:cc),s1(ntmc,:),'-',timdl(1:cc),s2(ntmc,:),'-');
    title('Plot of both S1 and S2 at Substation');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('S1','S2',0);
    grid on;

    ButtonName=questdlg('Do you want to create a figure to print?', ...
        'Print The Figure', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        figure;
        plot(timdl(1:cc),s1(ntmc,:),'-',timdl(1:cc),s2(ntmc,:),'-');
        title('Plot of both S1 and S2 at Substation');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Amplitude');
        legend('S1','S2',0);
        grid on;

```

```

        uiwait;
        %break

        case 'NO',
            %break
        end % switch

case 'NO',
    %break
end % switch

ButtonName=questdlg('Now, You can calculate the Discrete Cross-Correlation Function. Do you want?', ...
    'Cross-Correlation:', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',

    % thair=cc
    % tim=size(s1)

    assignin('base','s1',s1);
    assignin('base','s2',s2);

    s1n=[];
    s2n=[];

    q=tr;

    for i=1:(cc-q)
        s1n(1,i)=s1(1,q);
        s1n(2,i)=s1(2,q);
        s1n(3,i)=s1(3,q);
        q=q+1;
    end

    q=tr;

    for i=1:(cc-q)
        s2n(1,i)=s2(1,q);
        s2n(2,i)=s2(2,q);
        s2n(3,i)=s2(3,q);
        q=q+1;
    end

    s1=s1n;

    s2=s2n;

    ncc=max(size(s1));

ButtonName=questdlg('Do you want to see a figure used for Cross-Correlation?', ...
    'Signals for Cross-Correlation', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
    timdl=t(1:ncc);
    figure;
    plot(timdl,s1(ntmc,:), '-.',timdl,s2(ntmc,:),'-');
    xlabel('Time (s)');
    ylabel('Amplitude');
    legend('S1', 'S2',0);
    grid on;
    uiwait;

case 'NO',
    %break
end % switch

s1b=[];
s2b=[];
dena=[];
ccr=[];
ts1b=[];
ts1b=[];
tdena=[];

for j=1:3
    for nu=1:(ncc-(nswcc-1))
        s1b(j,nu)=0;
        for i=1:nswcc
            s1b(j,nu)=s1b(j,nu)+s1(j,nu-1+i);
        end
        ts1b(j,nu)=(1/nswcc)* s1b(j,nu);
    end
end

```

```

end

for j=1:3
    s2b(j,1)=0;
    for i=1:nswcc
        s2b(j,1)=s2b(j,1)+s2(j,i);
    end
    ts2b(j,1)=(1/nswcc)* s2b(j,1);
end

for j=1:3
    dena(j,1)=0;
    for i=1:nswcc
        dena(j,1)=dena(j,1)+[s2(j,i)-ts2b(j,1)]^2;
    end
    tdena(j,1)=(1/nswcc)* dena(j,1);
end

for j=1:3
    for nu=1:(ncc-(nswcc-1))
        ccr(j,nu)=0;
        for i=1:nswcc
            ccr(j,nu)=ccr(j,nu)+[s1(j,nu-1+i)-ts1b(j,nu)]*[s2(j,i)-ts2b(j,1)];
        end

        tccr(j,nu)=[(1/nswcc)* ccr(j,nu)]/tdena(j,1);
    end
end

timdl=ti(1:(ncc-(nswcc-1)));
plot(timdl,tccr(ntmc,:));
title('Plot of Cross-Correlation');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude');
% legend('Mode 1', 0);
grid on;

% mvl=abs(tccr(2,:));
% [maxval index]=max(mvl)
% tf=timdl(index)
% location=(tf*(3e+08))/3

ButtonName=questdlg('Do you want to create a figure to print?', ...
    'Print The Cross-Correlation x Distance (km)', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
    case 'YES',
        distkm=[];
        figure;
        timdl=ti(1:(ncc-(nswcc-1)));
        nut=size(timdl);

        for i=1:nut
            distkm(i,1)=[timdl(i,1)*(3*(10^5))]/2;
        end

        plot(distkm,tccr(ntmc,:));
        title('Plot of Cross-Correlation x Distance (km)');
        xlabel('Distance (km)');
        ylabel('Amplitude');
        % legend('Mode 1', 0);
        grid on;
        % uiwait;
        % break

    case 'NO',
        % break
end % switch

case 'NO',
    % break
end % switch

case 'No',
end % switch

% -----
function varargout = pushbutton13_Callback(h, eventdata, handles, varargin)

ButtonName=questdlg(' Now you can to determinate the Fault Location using the Cross-Correlation. Do you want ', ...
    'Fault Location', ...
    'Yes','No','No');

switch ButtonName,
    case 'Yes',

```



```

for i=1:busno-1
    cnames=strvcat(cnames,fscanf(fid,'%s',1));
end
%display(cnames);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% read all outno
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

noo=fscanf(fid,'%d',outno);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ButtonName=questdlg('Choose between Real Values or Estimated Values of Voltage:', ...
    'Choose Real or Estimated Values', ...
    'Real','Estimated','Cancel','Cancel');

switch ButtonName,
case 'Estimated',

    num=0;
    nofilo=0; % to define options of outputs
    for j=1:(vno/2)
        t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
        tt=(noo(2*j));
        num=j;
        num=num+1;
    end

    nu=num;

    if vno<outno
        for j=((vno/2)+1):(outno/2)
            t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
            tt=(noo(2*j)+(tacsno-2));
            if tt==0
                cellstring{nu}=cnames(t,:);
            else
                str=strcat(cnames(t,:),'-' ,cnames(tt,:));
                cellstring{nu}=str;
            end
            nofilo(j)=nu;
            nu=num+1;
        end
        %fprintf('nu= %d\n',nu);
        st={ cellstring{num:(nu-1)}};
    end

% matrices defined for scottishpower systems

prompt{1}='Transformation Matrix: ';
title1= 'Set Transformation Matrix';
default_ans={'1 1 1;1 0 -2;1 -1 1'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
m=answer;
t=char(m);
tm=str2num(t);

prompt{1}='Zmode Matrix: ';
title1= 'Set Zmode Matrix';
default_ans={'[540 0 0;0 262 0;0 0 262]'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
y=answer;
z=char(y);
zm=str2num(z);

prompt{1}='Number of Samples in Window: ';
title1= 'Set Number of Samples in Window for CC';
default_ans={'8'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
ns=answer;
nsw=char(ns);
nswcc=str2num(nsw);

estvoltmod0=[ ];
estvoltmod1=[ ];
estvoltmod2=[ ];

value=[ ];
value=fscanf(fid,'%f',Inf);

for kk=1:2
    is=0;

```



```

ns=[];
ti=[];
incti=[];
timdl=[];
out=[];
incout=[];
nofilo=[];

if kk==1
    msgbox(' Now! Define the phases of a healthy line, that will be used          to calculate S1 .','Healthy Line');
    uiwait;
end

if kk==2
    msgbox(' Now! Define the phases of faulted line, that will be used          to calculate S2 .','Faulted Line');
    uiwait;
end

for nums=1:3

    [s,v] = listdlg('PromptString','Select the Phases of Line:',...
        'SelectionMode','single','ListString',st);
    ns(nums,1)=(s+num - 1);
    leg4(nums)=cellstring(s+num - 1);

end

tams=length(ns);

for is=1:tams
    [nofilo(is)]=ns(is);
end

nn=[];

nn=(max(size(value))/(outno/2)+1);

m=0;
for i=1:nn
    ti(i,1)=value(1+m);

    if (ti(i,1)==0.0001)
        tct=i;
    end

    for is=1:tams
        out(i,is)=value(nofilo(is)+1+m);
    end

    m=m+((outno/2)+1);
end

m=0;

ButtonName=questdlg('Do you want to use the currents on Current Transducers?', ...
    'Current Transducers', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',

    %tii=ti
    vi1=out(:,1);
    vi2=out(:,2);
    vi3=out(:,3);

    assignin('base','nn',nn);
    assignin('base','ti',ti);
    assignin('base','vi1',vi1);
    assignin('base','vi2',vi2);
    assignin('base','vi3',vi3);

    ct3in;
    sim ct3in;

    ButtonName=questdlg('Do you want create a figure with the currents on Current Transducers?', ...
        'Current Transducers', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        figure;

        for r=1:tct
            output(r)=0.000;
            output1(r)=0.000;
            output2(r)=0.000;

```

```

end

plot(tout,output,'-',tout,output1,'--',tout,output2,'-.');
title('Currents on CT Substation Circuit');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Current');
legend('leg4,0');
grid on;
uiwait;

case 'NO',
%break
end % switch

ti=tout;
out=[output,output1,output2];

case 'NO',
%break
end % switch

% Sample time and time limits to incremental values
ta=0;

%tim=size(ti)

tmax=max(ti);

if tmax <= timf
    warndlg('You can not obtain the Modal Values for this file .pl4 !','Warning Dialog Box','modal');
    uiwait;
    uiresume;
end

ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
pp=timf/ta;
q=round(pp);
e=max(size(ti));
cc=(e-q);
indt=0;

if (vno < outno)
    %m=0;
    while q < e
        m=0;
        for c=1:cc
            incti(c,1)=ti(q,1);

            for is=1:tams
                incout(c,is)=out(q,is)-out(1+m,is);
            end

            q=q+1;
            if m==cc
                break
            end
            m=m+1;
        end
    end
end

atpout(:,1)=incti;

timdl=ti(1:cc);

for r=1:tct
    incout(r,1)=0.000;
    incout(r,2)=0.000;
    incout(r,3)=0.000;
end

valuephase=[incout(:,1),incout(:,2),incout(:,3)];

if kk==1

    valuemode=inv(tm)*valuephase';
    valuemodest=zm*valuemode;
    %%%%%%%%%%%
    % figure:
    % plot(timdl,valuemodest);
    % grid on;
    %%%%%%%%%%%
end

if kk==2

    valuemodfl=inv(tm)*valuephase';
    %%%%%%%%%%%
    % valfl=zm*valuemodfl;
    %%%%%%%%%%%
    % figure:
    % plot(timdl,valfl);
    % grid on;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% To create a file S1OUT at current directory
strname=sprintf('S1OUT %d');
fid=fopen(strname,'w');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

s1=((zm*valuemodfl)-valuemodest)/2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% To create a file S1OUT at current directory
for i=1:cc
    str=sprintf('%15.5e%15.5e%15.5e%15.5e\n',timdl(i,1),s1(1,i),s1(2,i),s1(3,i));
    fprintf(fid,'%s',str);
end
fclose(fid);
fprintf('\n The file S1OUT %d');
fprintf(' was created in current directory!\n');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% To create a file S2OUT at current directory
strname=sprintf('S2OUT %d');
fid=fopen(strname,'w');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

s2=((zm*valuemodfl)+valuemodest)/2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% To create a file S2OUT at current directory
for i=1:cc
    str=sprintf('%15.5e%15.5e%15.5e%15.5e\n',timdl(i,1),s2(1,i),s2(2,i),s2(3,i));
    fprintf(fid,'%s',str);
end
fclose(fid);
fprintf('\n The file S2OUT %d');
fprintf(' was created in current directory!\n');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% mvlsl=abs(s1(2,:));
% [maxval index]=max(mvlsl)
% ts1=timdl(index)

end

end

end

case 'Real'

num=0;
nofilo=0; % to define options of outputs
for j=1:(vno/2)
    t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
    tt=(noo(2*j));
    num=j;
    if tt==0
        cellstring{num}=cnames(t,:);
    else
        str=strcat(cnames(t,:),'-',cnames(tt,:));
        cellstring{num}=str;
    end
    nofilo(j)=num;
    num=num+1;
end

nu=num;

if vno<outno
    for j=((vno/2)+1):(outno/2)
        t=(noo(2*j-1)+(tacsno-2));
        tt=(noo(2*j)+(tacsno-2));
        if tt==0
            cellstring{nu}=cnames(t,:);
        else
            str=strcat(cnames(t,:),'-',cnames(tt,:));
            cellstring{nu}=str;
        end
        nofilo(j)=nu;
        nu=nu+1;
    end
    % fprintf('nu= %d\n',nu);
    % st={cellstring{num:(nu-1)}};

end

```

```

% matrices defined for scottishpower systems

prompt{1}='Transformation Matrix: ';
title1= 'Set Transformation Matrix';
default_ans={['1 1 1;1 0 -2;1 -1 1']};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
m=answer;
t=char(m);
tm=str2num(t);

prompt{1}='Zmode Matrix: ';
title1= 'Set Zmode Matrix';
default_ans={['540 0 0;0 262 0;0 0 262']};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
y=answer;
z=char(y);
zm=str2num(z);

prompt{1}='Number of Samples in Window: ';
title1= 'Set Number of Samples in Window for CC';
default_ans={'8'};
answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
ns=answer;
nsw=char(ns);
nswcc=str2num(nsw);

value=[ ];
value=fscanf(fid,'%f',Inf);

for kk=1:2

    is=0;
    ns=[ ];
    ti=[ ];
    incti=[ ];
    timdl=[ ];
    out=[ ];
    incout=[ ];
    nofilo=[ ];

    if kk==1
        msgbox(' Now! Define the phases of voltage at healthy line, that will be used          to calculate S1 .','Healthy Line');
        uiwait;
        end

    if kk==2
        msgbox(' Now! Define the phases of current at faulted line, that will be used          to calculate S2 .','Faulted Line ');
        uiwait;
        end

    [s,v] = listdlg('PromptString','Select 3 Outputs Values: ',...
        'SelectionMode','multiple','ListString',cellstring);

    tams=length(s);

    if (tams~=3)& (tams~=0)
        errordlg('Invalid number of outputs, you need to select 3 !','Error Dialog Box','modal');
        break
    end

    for is=1:tams
        [nofilo(is)]=s(is);
    end

    leg3=cellstring(s);

    nn=(max(size(value))/(outno/2)+1);

    m=0;
    for i=1:nn
        ti(i,1)=value(1+m);

        if (ti(i,1)==0.0001)
            tct=i;
        end

        for is=1:tams
            out(i,is)=value(nofilo(is)+1+m);
        end

        m=m+((outno/2)+1);
    end

    m=0;

    ButtonName=questdlg('Do you want to use the Filter?', ...

```

```

    'Voltage and Current Transducers', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',

    %tii=ti
    vi1=out(:,1);
    vi2=out(:,2);
    vi3=out(:,3);

    assignin('base','nn',nn);
    assignin('base','ti',ti);
    assignin('base','vi1',vi1);
    assignin('base','vi2',vi2);
    assignin('base','vi3',vi3);

    ct3in;
    sim ct3in;

    ButtonName=questdlg('Do you want create a figure with the outputs on Filter?', ...
        'Current and Voltage Transducers', ...
        'YES','NO','NO');

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        figure;

        for r=1:tct
            output(r)=0.000;
            output1(r)=0.000;
            output2(r)=0.000;
        end

        plot(tout,output,'-',tout,output1,'--',tout,output2,'-.');
        title('Output on Filter at Substation Circuit');
        xlabel('Time (s)');
        legend('leg3,0');
        grid on;
        uiwait;

    case 'NO',
        %break
    end % switch

    ti=tout;
    out=[output,output1,output2];

    case 'NO',
        %break
    end % switch

% Sample time and time limits to incremental values
ta=0;

%ttim=size(ti)

tmax=max(ti);

if tmax <= timf
    warndlg('You can not obtain the Modal Values for this file .pl4 !','Warning Dialog Box','modal');
    uiwait;
    uiresume;
end

ta=(max(ti))/(max(size(ti)));
pp=timf/ta;
q=round(pp);
e=max(size(ti));
cc=(e-q);
indt=0;

if (vno < outno)
    %m=0;
    while q < e
        m=0;
        for c=1:cc
            incti(c,1)=ti(q,1);

            for is=1:tams
                incout(c,is)=out(q,is)-out(1+m,is);
            end

            q=q+1;
            if m==cc
                break
            end
            m=m+1;
        end
    end
end
end

```

```

atpout(:,1)=incti;

timdl=ti(1:cc);

for r=1:tct
    incout(r,1)=0.000;
    incout(r,2)=0.000;
    incout(r,3)=0.000;
end

valuephase=[incout(:,1),incout(:,2),incout(:,3)];

if kk==1

    valuemode=inv(tm)*valuephase';

    %valuemodest=zm*valuemode;
    %%%%%%%%%%%
    %figure;
    %plot(timdl,valuemodest);
    %grid on;
    %%%%%%%%%%%
end

if kk==2

    valuemodfl=inv(tm)*valuephase';
    %%%%%%%%%%%
    %valfl=zm*valuemodfl;
    %%%%%%%%%%%
    %figure;
    %plot(timdl,valfl);
    %grid on;
    %%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%
% To create a file S1OUT at current directory
strname=sprintf('S1OUT %d');
fid=fopen(strname,'w');

%%%%%%%%%%

s1=((zm*valuemodfl)-valuemode)/2;

%%%%%%%%%%
% definicao do inicio da cross-correlation
%tcr=[];

%for t=1:cc
%    %valors1=s1(2,t);
%    %if abs(valors1)>10000
%        %break
%    %end
%    %tcr=t;
%end
%tcr=tcr-2

%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%
% To create a file S1OUT at current directory
for i=1:cc
    str=sprintf('%15.5e%15.5e%15.5e%15.5e\n',timdl(i,1),s1(1,i),s1(2,i),s1(3,i));
    fprintf(fid,'%s',str);
end
fclose(fid);
%fprintf('\n The file S1OUT %d');
%fprintf (' was created in current directory!\n');

%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%
% To create a file S2OUT at current directory
strname=sprintf('S2OUT %d');
fid=fopen(strname,'w');

%%%%%%%%%%

s2=((zm*valuemodfl)+valuemode)/2;

%%%%%%%%%%
% To create a file S2OUT at current directory
for i=1:cc
    str=sprintf('%15.5e%15.5e%15.5e%15.5e\n',timdl(i,1),s2(1,i),s2(2,i),s2(3,i));
    fprintf(fid,'%s',str);
end
fclose(fid);
%fprintf('\n The file S2OUT %d');
%fprintf (' was created in current directory!\n');

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %mvls1=abs(s1(2,:));
    % [maxval index]=max(mvls1)
    %ts1=timdl(index)

    end

    end

    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Values mode 1%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %valoresS1=[s1(2,:)];

    %mvls1=abs(s1(2,:));
    % [maxval index]=max(mvls1)
    %ts1=timdl(index)
    %tcr=index-5

    %valoresS2=[s2(2,:)];

    %mvls2=abs(s2(2,:));
    % [maxval index]=max(mvls2)
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    case 'Cancel',
        break
    end % switch

    ButtonName=questdlg('Do you want plot both S1 and S2?', ...
        'Plot S1 and S2:', ...
        'YES','NO','NO');

    prompt{1}='Choice The Mode: ';
    title1='Set the Mode to plot S1 and S2 (Modes 0, 1 or 2)';
    default_ans={'1'};
    answer=inputdlg(prompt,title1,1,default_ans);
    tm=answer;
    ntm=char(tm);
    nmc=str2num(ntm);
    ntmc=nmc+1;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Values Modes %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    mvls1=abs(s1(ntmc,:));
    [maxval index]=max(mvls1);

    tcr=index-5;

    mvls2=abs(s2(ntmc,:));
    [maxval index]=max(mvls2);

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    switch ButtonName,
    case 'YES',
        plot(timdl(1:cc),s1(ntmc,:),'-',timdl(1:cc),s2(ntmc,:),'-');
        title('Plot of both S1 and S2 at Substation');
        xlabel('Time (s)');
        ylabel('Amplitude');
        legend('S1','S2',0);
        grid on;

        ButtonName=questdlg('Do you want to create a figure to print?', ...
            'Print The Figure', ...
            'YES','NO','NO');

        switch ButtonName,
        case 'YES',
            figure;
            plot(timdl(1:cc),s1(ntmc,:),'-',timdl(1:cc),s2(ntmc,:),'-');
            title('Plot of both S1 and S2 at Substation');
            xlabel('Time (s)');
            ylabel('Amplitude');
            legend('S1','S2',0);
            grid on;
            uiwait;
            %break
        case 'NO',
            %break
        end % switch

    case 'NO',

```



```

        legend('S1', 'S2',0);
        grid on;
        uiwait;

        case 'NO',
            %break
        end % switch

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

s1b=[ ];
s2b=[ ];
dena=[ ];
ccr=[ ];
ts1b=[ ];
ts1b=[ ];
tdena=[ ];

for j=1:3
    for nu=1:(ncc-(nswcc-1))
        s1b(j,nu)=0;
        for i=1:nswcc
            s1b(j,nu)=s1b(j,nu)+s1(j,nu-1+i);
        end
        ts1b(j,nu)=(1/nswcc)* s1b(j,nu);
    end
end

for j=1:3
    s2b(j,1)=0;
    for i=1:nswcc
        s2b(j,1)=s2b(j,1)+s2(j,i);
    end
    ts2b(j,1)=(1/nswcc)* s2b(j,1);
end

for j=1:3
    dena(j,1)=0;
    for i=1:nswcc
        dena(j,1)=dena(j,1)+[s2(j,i)-ts2b(j,1)]^2;
    end
    tdena(j,1)=(1/nswcc)* dena(j,1);
end

for j=1:3
    for nu=1:(ncc-(nswcc-1))
        ccr(j,nu)=0;
        for i=1:nswcc
            ccr(j,nu)=ccr(j,nu)+[s1(j,nu-1+i)-ts1b(j,nu)]*[s2(j,i)-ts2b(j,1)];
        end

        tccr(j,nu)=[(1/nswcc)* ccr(j,nu)]/tdena(j,1);
    end
end

timdl=ti(1:(ncc-(nswcc-1)));
plot(timdl,tccr(ntmc,:));
title ('Plot of Cross-Correlation');
xlabel('Time (s)')
ylabel('Amplitude');
% legend('Mode 1', 0);
grid on;

% mvl=abs(tccr(2,:));
% [maxval index]=max(mvl)
% tf=timdl(index)
% location=(tf*(3e+08))/3

ButtonName=questdlg('Do you want to change the scale to km?', ...
    'The Cross-Correlation x Distance (km)', ...
    'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
    case 'YES',
        distkm=[ ];
        timdl=ti(1:(ncc-(nswcc-1)));
        nut=size(timdl);

        for i=1:nut
            distkm(i,1)=[timdl(i,1)*(3*(10^5))]/2;
        end

        plot(distkm,tccr(ntmc,:));
        title ('Plot of Cross-Correlation x Distance (km)');
        xlabel('Distance (Km)')

```

```

ylabel('Amplitude');
grid on;

%CURS = cursor(tccr,distkm)
% thair=distkm
% mvl=abs(tccr(ntmc,:))
% [maxval index]=max(mvl)
% tf=timdl(index)
% location=(tf*(3e+08))/3

ButtonName=questdlg('Do you want to create a figure to print?', ...
'Print The Figure', ...
'YES','NO','NO');

switch ButtonName,
case 'YES',
figure;
plot(distkm,tccr(ntmc,:));
title ('Plot of Cross-Correlation x Distance');
xlabel('Distance (Km)')
ylabel('Amplitude');
grid on;
uiwait;
%break

case 'NO',
%break
end % switch

case 'NO',
%break
end % switch

case 'No',
break;

end % switch

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL, Resolução nº 24, de 27 de janeiro de 2000 da ANEEL- Estabelece as disposições relativas a continuidade da distribuição de energia elétrica. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, nº 20-E, de 28 de janeiro de 2000, Seção 1, pág.23 a 26.
- [2] D'AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S. *et al. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta-Tensão*. FURNAS e Editora UFF(Universidade Federal Fluminense).
- [3] DUGAN, R. C., McGRANAGHAM, M. F. and BEATY, H. W., *Electric Power Systems Quality* , McGraw Hill, New York, 1996.
- [4] BOLLEN, M. H. J., *Understanding Power Quality Problems* , IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- [5] SOLLERO, R. B.; ROSS, R. P. and SOUZA, L. F. W., Power Quality Concerns in Brazil *Sessão Bienal do CIGRÉ*, pp. 33-38, March 2001.
- [6] BEWLEY, L. V., *Travelling Waves on Transmission Systems*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1963.
- [7] COOK, V., *Fundamental Aspects of Fault Location Algorithms Used in Distance Protection*, IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. C., 1986, pp. 359-366.
- [8] WISZNIEWSKI, A., *Accurate Fault Impedance Locating Algorithm*, IEE Proceedings, Vol.130, Pt.C, 1993, pp. 331-334.
- [9] ANCELL, G. B. and PAHALAWATHTHA, N.C., *The Effects of Frequency Dependence and Line Parameters on Single Ended Travelling Wave Based Fault Location Schemes*, IEE Proc. C, Vol. 139, 1992, pp. 332-342.
- [10] GALE, P.F., TAYLOR, P.V., NAIDOO P., HITCHIN C. and CLOWES D., *Travelling Wave Fault Locator Experience on Eskom's Transmission Network*, Developments in Power System Protection, Seventh International Conference on IEE, Published 2001, pp.327-330.
- [11] AURANGZEB, M., CROSSLEY, P. A. and GALE, P., *Fault Location Using the High Frequency Travelling Waves Measured at a Single Location on a Transmission Line*, Developments in Power System Protection, Conference Publication No 479, IEE 2001.
- [12] HOROWITZ, S. H., PHADKE, A.G., THORP, J.S. *Adaptive Transmission System Relaying*, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.3, No.4, pp. 1436-1445, Oct 1988.

- [13] SILVEIRA, P. M., *Identificação e Localização de Falhas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet para Relés de Linhas de Transmissão*. Tese de Doutorado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Maio,2001.
- [14] SIDHU, T.S., SINGH, H., SACHDEV, M.S., *Design, Implementation and Testing of an Artificial Neural Network Based Fault Direction Discriminator for Protecting Transmission Lines*, IEEE Trans.on Power Delivery, No.2, pp.697-706, Apr 1995.
- [15] BO Z.Q., JOHNS A.T. and AGGARWAL R.K., *A Novel Fault Locator Based on the Detection of Fault Generated High Frequency Transients*, Developments in Power System Protection, 25-27th March 1997, Conference Publication No 434, IEE, 1997.
- [16] THOMAS, D.W. P.; BATTY, R. E.; CHRISTOPOULOS, C. *et al.* A Novel Transmission-Line Voltage Measuring Method. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 47, no.5 , pp1265-1270, Oct.1998.
- [17] THOMAS, D.W. P, OMENKA, V. U., CHRISTOPOULOS, C. *et al.* Validation of a Novel Unit Protection Scheme Based on Superimposed Currents. *International Conference on Power System Protection, PSP'98 – Bled, Slovenia*, pp 161-166; Set.-Oct.1998.
- [18] Bonneville Power Administration, Electromagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book, April , 1982.
- [19] PEREIRA, M. P., AMON Filho, J. , FONSECA, C. S. *et al* . Experiência de Utilização do Programa ATP-Micro em Simulação de Transitórios Eletromagnéticos. XI SNPTEE, Rio de Janeiro, 1991.
- [20] VELASCO, J.A.M. and ARNEDO, J. M. *EMTP Modular Library for Power Quality* , Sep. 1999.
- [21] KIZILCAY, M. and PRIKLER, L., *ATP-EMTP Beginners Guide for EEUG Members*, Osnabruck University of Applied Science, Germany, June 2000.
- [22] CHAPMAN, S. J., *Matlab Programming for Engineers*, 2nd Edition, Book ware Companion Series, The Wadsworth Group, Inc. Thomson Learning, 2002.
- [23] BRONZEADO, H. S.; RAMOS, A J. P.; OLIVEIRA, J.C. *et al.* Uma Proposta de Termos e Definições Associados à Qualidade da Energia Elétrica. *II Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica –SBQEE*, São Lourenço, Nov. 1997.
- [24] IEEE Standard 1159, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, 1995.
- [25] ABREU, J. P. G.; FILHO, J. M. C. e FREITAS, O P. O .Reflexos da Conservação na Qualidade da Energia Elétrica. . *II Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica –SBQEE*, São Lourenço, Nov. 1997.

- [26] WG-Document (Draft), *Power Quality Indices and Objectives*. CIGRE Working Group 36.07, Sep. 2001.
- [27] SCC 22- *Standards Coordinating Committee* : Chater, www.standards.ieee.org .
- [28] CLAYTON R. P., *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, Kai Chang, Editor.
- [29] IEC 61000-2-5 (1995): *Classification of Electromagnetic Environments*.
- [30] MARTZLOFF, F. , *Power Quality Work at The International Electrotechnical Commission*, PQA-97 Europe, Stockholm, Sweden, June 1997.
- [31] MUSTAFA, T. I. A. H. e RAIZER, A., A Qualidade de Energia Frente a Compatibilidade Eletromagnética, artigo submetido ao Comitê Editorial da Revista IEEE América Latina, ISSN 1548-0992 , Dezembro 2003.
- [32] BRONZEADO, H. S. *Curso Especial: Qualidade da Energia Elétrica*. Universidade Federal de Pernambuco, CTG/EEPE/DEESP, Recife, Maio, 2000.
- [33] THOMAS, D.W. P., *Protection of Major Transmission Lines Using Travelling Waves*, Thesis submitted to the University of Nottingham for degree of Doctor of Philosophy, May 1990.
- [34] WEDEPOHL, L.M., *Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling Wave Phenomena in Polyphase Systems*, Proceedings of IEE, Vol.110, No.12, pp.2200-2212, Dec 1963.
- [35] WEDEPOHL, L. M. and MOHAMED, S.E.T., *Multiconductor Transmission Lines-Theory of Natural Modes and Fourier Integral Applied to Transient Analysis*, Proc. IEE pt. C, Vol.116(9), 1969, pp. 1553-1563.
- [36] PATHIRANA V., McLAREN P.G. and DIRKS E., *Investigation of a Hybrid Travelling Wave-Impedance Relay Principle*, Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering.
- [37] MAGNUSSON, P.C., *Travelling Waves on Multi-Conductor Open-Wire Lines - A Numerical Survey of The Effects of Frequency Dependence Of Modal Composition*, IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, USA, July 1972, pp. 999-1008.
- [38] WASLEY, R.G. and SELVAVINAYAGAMORTHY, S., *Approximate Frequency-Response Values for Transmission Line Transient Analysis*, Proc. IEE pt. C, vol. 121(4),1974, pp. 281-286.
- [39] CABEZA-REZENDEZ, L.Z., GREENWOOD, A. N. and LAUBER, T.S., *Evaluation of Ultra-High Speed Relay Algorithms*, EPRI Research Project 1422-2 EL-3996, Final Report 1985.

- [40] DOMMEL, H. W. and MICHELS, J.H., *High Speed Relaying Using Travelling Wave Transient Analysis*, IEEE Winter Power Meeting, New York, Jan 29 - Feb 3, 1978, paper No A78 214-9.
- [41] STREET, M. A., THUREN, I. P. and MARTIN, K. E., *Positioning System Applications at the Bonneville Power Administration*, Northcon 95, IEEE Technical Applications Conference and Workshops Northcon 95, 1995, pp. 244-251.
- [42] KAWADY, T. and STENZEL J., *Investigation of Practical Problems for Digital Fault Location Algorithms Based on EMTP Simulation*, 0-7803-7525-4/02, IEEE PES T&D Conference and Exhibition 2002.
- [43] JEYASURA, B. and RAHMAN, M. A., *Accurate Fault Location of Transmission Lines Using Microprocessors*, Developments in Power System Protection 1988, Forth International Conference, pp. 13-17.
- [44] GIRGIS, A., HART, D. and PETERSON, W., *A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines*, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 7, No. 1, Jan. 1992, pp. 98-107.
- [45] HEDMEN D. E. Propagation on Overhead Transmission Lines, Part 1- Theory of Modal Analysis. *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, Vol. 84, p. 489, 1965.
- [46] FILHO, J. A; PEREIRA, M. P. *Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*. Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, Nov. 1996.
- [47] *Guidelines for Representation of Network Elements When Calculating Transients*. CIGRE Working Grouping 33.02, CIGRE Technical Brochure 39, 1990.
- [48] THOMAS, D.W.P., CHRISTOPOULOS, C. , MUSTAFA, T.I.A.H., TANG, Y. and RAIZER, A., *EHV High Frequency Transient Transmission in Substations*, V Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo - CBMag 2002, Gramado/RS, Novembro,2002.
- [49] MUSTAFA, T.I.A.H, THOMAS, D.W.P., CHRISTOPOULOS, C. and RAIZER, A., *Comparison of Simulated and Recorded Transients for Travelling Wave Fault Location*, Bologna IEEE PowerTech '2003, Bologna, Italy, Jun. 2003.
- [50] THOMAS, D.W.P., CHRISTOPOULOS, C. and TANG, Y., *Travelling-Wave Current Transducer Measurement Report*, School of Electrical and Electronic, University of Nottingham, UK, July 2000.
- [51] VELASCO, J. M. and GUSTAVSEN, B. Overview of Overhead Line Models and Their Representation in Digital Simulations. *IPST'2001 International Conference on Power Systems Transients*, Rio de Janeiro, Jun. 2001.
- [52] BEAUCHAMP, K.G, *Signal Processing Using Analogue and Digital Techniques* . Pub. Allen and Unwin Ltd., 1973 Chapter 9, pp.400-467.

- [53] MUSTAFA, T.I.A.H, RAIZER, A., THOMAS, D.W.P., CHRISTOPOULOS, C. and DUARTE, A. L., *An Analysis Using Travelling Waves Transients in the Fault Location on Brazilian Power System*, *ELETROSUL*, IX SEPOPE 2004, Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Rio de Janeiro/RJ, May, 2004.
- [54] MUSTAFA, T.I.A.H, RAIZER, A., THOMAS, D.W.P., CHRISTOPOULOS, C. and CARVALHO, R.J.O., *Analysis of High Frequency Travelling Waves to the Fault Location on Brazilian Power System*, paper accepted to EMC Europe, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, Netherlands, September, 2004.
- [55] THOMAS, D. W. P., CHRISTOPOULOS, C., CARVALHO, R. C. O. and PEREIRA, E. T. “*Single and Double Ended Travelling Wave Fault location on a MV System*” IEE Eight International Conference on Developments in Power System Protection, The Netherlands, April 2004.