

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA VERIFICAÇÃO DA COORDENAÇÃO E
AUXÍLIO NA DETERMINAÇÃO DOS AJUSTES DE RELÉS DIRECIONAIS DE
SOBRECORRENTE DE NEUTRO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação submetida como parte dos requisitos para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

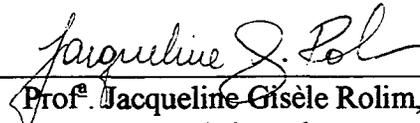
Odemar Solano Klock Jr.

Florianópolis, Novembro de 1998

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA VERIFICAÇÃO DA
COORDENAÇÃO E AUXÍLIO NA DETERMINAÇÃO DOS
AJUSTES DE RELÉS DIRECIONAIS DE SOBRECORRENTE DE
NEUTRO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Odemar Solano Klock Jr.

‘Esta dissertação foi julgada para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica,
Área de Concentração em Sistemas de Potência.
e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação’



Prof.^a Jacqueline Gisèle Rolim, D.Eng.
Orientadora



Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Coordenador do Curso

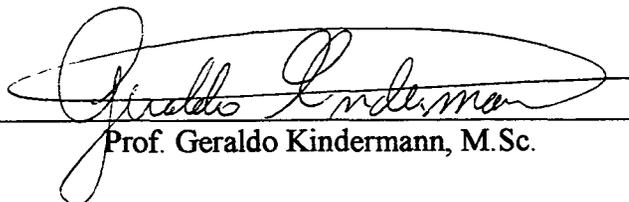
Banca Examinadora:



Prof.^a Jacqueline Gisèle Rolim, D.Eng.
Orientadora



Prof. Jorge Coelho, D.Eng.



Prof. Geraldo Kindermann, M.Sc.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

À minha esposa Izabella e ao meu filho André Luís

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e em especial:

à professora Jacqueline Gisele Rolim, pela orientação e valiosas críticas;

aos colegas Mauro, Rogério, Romeiro, Puppi, Jorge, Toshio, Queiji, Gilmar, Molinari, Paulo e Adalberto pelas discussões, sugestões e valiosa colaboração;

à Companhia Paranaense de Energia (COPEL), através das chefias imediatas, José Augusto, Nelson Grebogi e Lindolfo Zimmer, pelo apoio;

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	5
2.1 A FILOSOFIA DA PROTEÇÃO POR RELÉS	5
2.1.1 Zonas de proteção e seletividade	6
2.1.2 Proteção primária e retaguarda	9
2.1.3 Coordenação da proteção por relés	9
2.2 PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DOS RELÉS	11
2.2.1 Detecção de faltas	11
2.2.2 Aspectos construtivos dos relés de proteção	16
2.3 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR RELÉS DE DISTÂNCIA	17
2.4 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR RELÉS DE SOBRECORRENTE	21
2.5 CONCLUSÃO	26
CAPÍTULO 3 COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE	27
3.1 INTRODUÇÃO	27
3.2 O PROCESSO DE COORDENAÇÃO	31
3.3 DADOS NECESSÁRIOS PARA A COORDENAÇÃO	33
3.3.1 Cálculo do curto-circuito	34
3.3.2 Características de operação dos relés de sobrecorrente	36

3.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3.4.1 <i>A coordenação por algoritmos</i>	38
3.4.2 <i>A coordenação por técnicas de otimização</i>	40
3.4.3 <i>A coordenação por sistemas especialistas</i>	42
3.5 CONCLUSÃO	43
CAPÍTULO 4 IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA	45
4.1 INTRODUÇÃO	45
4.2 CÁLCULO DO CURTO-CIRCUITO.....	46
4.2.1 <i>Dados de entrada</i>	46
4.2.2 <i>Montagem das matrizes de rede</i>	48
4.2.3 <i>Cálculo das contingências</i>	49
4.2.4 <i>Testes realizados</i>	50
4.3 DADOS DE AJUSTE DOS RELÉS	52
4.3.1 <i>Entrada de dados</i>	52
4.3.2 <i>Armazenamento dos dados de relés</i>	53
4.3.3 <i>Pesquisa na estrutura esparsa</i>	54
4.4 CÁLCULO DA COORDENAÇÃO.....	54
4.5 A INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	57
4.6 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA	63
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	67
APÊNDICE - A DADOS DO SISTEMA EXEMPLO	69
APÊNDICE - B ABERTURA DE UMA LINHA MUTUAMENTE ACOPLADA	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

RESUMO

Este trabalho apresenta uma ferramenta computacional para verificação da coordenação e auxílio na determinação dos ajustes de relés de sobrecorrente direcionais de terra, implementado em Visual Basic®, o que garante uma interface homem-máquina muito amigável com comandos utilizando o *mouse*. Esta ferramenta integra um programa de curto-circuito, com os valores de ajuste dos relés e com os dados de suas características de atuação. O programa permite que seja selecionado qualquer par de proteção primária/retaguarda do sistema elétrico e então traça o gráfico da coordenação e verifica a coordenação indicando se existe seletividade para qualquer falta monofásica no sistema de energia elétrica.

O programa de curto-circuito desenvolvido foi implementado utilizando técnicas de esparsidade com métodos de compensação, utilizando a matriz de admitância de barras. Uma característica deste programa é que não existe a necessidade do tratamento de grupos de linhas de transmissão mutuamente acopladas.

Outras facilidades implementadas nesta ferramenta são:

- qualquer contingência no sistema elétrico pode ser simulada;
- busca no sistema dos relés de proteção primária e/ou retaguarda de um determinado relé;
- possibilidade de ajuste automático da proteção de retaguarda.

ABSTRACT

This work presents a computational tool for coordination checking and for aiding the determination of directional overcurrent ground relay settings. It was implemented in Microsoft Visual Basic ®, which provides a friendly man-machine interface with commands emitted by mouse. This tool integrates a short-circuit program, with the relay settings data and their operating characteristics. The program allows any primary/backup relay pair to be selected from the electrical system and then it draws the coordination graph and verifies the coordination for any phase to ground short-circuit in the electrical system.

The short-circuit program developed was implemented using sparsity techniques in conjunction with compensation methods, using the bus admittance frame. The novelty in this program is that there is no need to treat mutual coupling groups of transmission lines.

Other facilities implemented in this tool are:

- simulation of any contingency in the electrical system;
- search of primary or backup relays of a given relay;
- automatic backup relay setting.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Um fator de contribuição decisivo na confiabilidade de um sistema de energia elétrica diz respeito ao sistema de proteção por relés. Os relés de proteção constituem o investimento de maior retorno de um sistema elétrico. Seu custo é insignificante comparado ao custo dos equipamentos que protegem. No entanto, os relés de proteção podem vir a ser a maior fonte de desligamentos indesejados / errôneos de um dado sistema se não forem adequadamente aplicados, ajustados e mantidos.

Os relés de proteção são uma forma de seguro ativo projetado para manter um alto grau de continuidade de serviço, segurança de pessoal e limitação de danos a equipamentos.

Os relés de proteção estão conectados ao sistema de energia elétrica energizados, mas eles ficam inativos, até que uma situação anormal ocorra dentro de sua zona de operação. Desta forma, é impossível saber se os relés responderão e operarão corretamente na ocorrência de uma emergência. Esta é uma das principais razões para que se adote a manutenção preventiva dos sistemas de proteção. Entretanto, sempre haverá uma situação que não pôde ser corrigida, ou um erro não encontrado.

Um outro tipo de acompanhamento que é feito para verificar o desempenho dos relés de proteção é através da análise de perturbações. O objetivo da análise de perturbações é identificar erros, falhas ou defeitos em relés de proteção pela análise de suas atuações durante

perturbações no sistema de energia elétrica. Acredita-se que a grande maioria das intervenções corretivas em relés de proteção sejam devidas à análise de perturbações.

No sistema de energia elétrica da Companhia Paranaense de Energia - COPEL, 67% das perturbações têm origem em linhas de transmissão e a grande maioria dos defeitos observados são curtos-circuitos monofásicos. A proteção das linhas de transmissão, na COPEL, é feita por relés de distância para defeitos entre fases e por relés direcionais de sobrecorrente para defeitos monofásicos.

O primeiro passo na análise de perturbações é compatibilizar as atuações dos relés de proteção com seus ajustes. Portanto, a compatibilização das atuações dos relés de proteção envolve, na sua maioria, a verificação da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais de neutro. Esta verificação de coordenação é uma tarefa tediosa, exigindo um grande número de cálculos simples e plotagem de curvas.

A arte da proteção por relés vem sendo praticada há muitos anos. Os engenheiros de proteção tentam manter os relés coordenados desde que o primeiro amperímetro de contato móvel, ou relé de sobrecorrente, foi colocado em serviço. Com o passar dos anos, muitas ferramentas foram aplicadas para facilitar o processo de coordenação, sendo a mais recente o computador. Os computadores revolucionaram o processo de projeto, análise e controle dos sistemas de energia elétrica. O desenvolvimento de algoritmos computacionais eficientes têm facilitado em larga escala estudos de fluxo de potência, curto-circuito, estabilidade transitória e uma variedade de controles e funções de gerenciamento em tempo real. Porém, pouco esforço foi focalizado no desenvolvimento de programas computacionais para resolver os problemas da engenharia de proteção. Isto pode ser atribuído ao conceito geral de que o *software* de proteção desenvolvido para um usuário pode não adequar-se às necessidades de outras companhias ou pode estar em conflito com algumas de suas filosofias. Isto é verdade

principalmente porque a maioria dos programas de coordenação desenvolvidos têm embutido em seu código os critérios de ajuste, impedindo que o engenheiro de proteção possa interagir diretamente no processo de ajuste. Com isto este tipo de ferramenta as vezes pode ter a sua aplicação limitada.

Levando em conta o que foi dito até aqui e sabendo que nenhum programa computacional pode substituir o engenheiro de proteção, que deve utilizar seu talento e a velocidade do computador para manter a excelência da proteção do sistema, o objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta computacional para a verificação da coordenação de relés de sobrecorrente direcionais de neutro e ao mesmo tempo proporcionar a sua utilização na determinação dos ajustes destes relés.

Cabe salientar aqui que esta ferramenta não tem por objetivo determinar os ajustes de relés direcionais de sobrecorrente de neutro de linhas de transmissão, como é o caso de ferramentas como o CAPE [8,23,24], WESCARGO [2] e RELAY-PC [6] que determinam os ajustes de todos os relés de um determinado sistema ou subsistema elétrico. A ferramenta desenvolvida neste trabalho está voltada para a verificação da coordenação e pretende facilitar o trabalho do engenheiro de proteção durante a execução de análises de perturbações e análises de desligamentos programados, além de proporcionar um auxílio na determinação dos ajustes dos relés. A verificação da coordenação é feita apenas para um par de relés de proteção primária / retaguarda definido pelo usuário e não para o sistema elétrico inteiro.

O capítulo 2 apresenta as linhas gerais para a proteção das linhas de transmissão, iniciando com a filosofia de proteção, passando pelos princípios de operação dos relés e aplicando relés de distância e sobrecorrente para a proteção das linhas de transmissão. O capítulo 3 apresenta o problema da coordenação de relés de sobrecorrente, mostra os dados necessários para a sua realização e traz uma revisão bibliográfica sobre o assunto da

coordenação de relés utilizando o computador. No capítulo 4 é apresentada a entrada de dados para o programa desenvolvido e como foram implementadas as funções que integram o cálculo do curto-circuito com os dados de ajuste dos relés e a verificação da coordenação. E finalmente, no capítulo 5, temos as conclusões finais do trabalho.

CAPÍTULO 2

PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 A FILOSOFIA DA PROTEÇÃO POR RELÉS

O sistema de proteção por relés é uma parte vital de qualquer sistema de energia elétrica, quase desnecessário durante a operação normal, mas muito importante durante problemas de perda de potência, afundamentos de tensão, sobretensões, eventos naturais, acidentes físicos, falhas em componentes, manobras indevidas, que em sua maioria resultam em faltas ou curtos-circuitos. Os relés de proteção ficam conectados ao sistema de energia elétrica, através de transformadores de corrente e de potencial, energizados e inativos, até que uma situação intolerável ocorra. O seu propósito é limitar a extensão do dano ao componente, minimizar o perigo para as pessoas, reduzir esforços em outros componentes e acima de tudo remover do sistema de energia elétrica o componente sob falta tão rápido quanto possível, de maneira que a integridade e a estabilidade do restante do sistema sejam mantidas.

Portanto, pode-se dizer que, a função dos relés de proteção é detectar condições anormais, indesejáveis ou intoleráveis no sistema de energia elétrica e causar a pronta remoção de serviço dos componentes sob falta, ou dos componentes sujeitos a danos, ou ainda dos componentes que de alguma maneira possam interferir na efetiva operação do restante do sistema.

Nesta função, os relés de proteção são complementados por disjuntores que são capazes de desconectar o componente em questão, quando chamados a atuar pelos relés de proteção. Os disjuntores estão localizados de tal maneira que cada gerador, transformador, barra, linha de transmissão, etc., possa ser desconectado por completo do resto do sistema. Estes disjuntores devem ter capacidade suficiente para que possam conduzir momentaneamente a corrente máxima de curto-circuito que pode fluir através deles, e então interromper esta corrente; devem suportar também o religamento sob um curto-circuito e interrompê-lo de acordo com certas normas preestabelecidas.

Uma função secundária dos relés de proteção é indicar a localização e o tipo de defeito. Estas informações não só auxiliam no rápido reparo mas, também pela observação de suas atuações complementada pelos registros oscilográficos, fornecem meios para verificação da efetividade das características de mitigação e prevenção da falta.

Os seguintes aspectos devem ser considerados em um sistema de proteção por relés [30]:

- confiabilidade: habilidade do sistema de proteção atuar corretamente quando necessário e evitar atuações desnecessárias;
- rapidez: mínimo tempo de defeito, para evitar danos em equipamentos;
- seletividade: máxima continuidade de serviço, com o mínimo de desligamentos de equipamentos;
- economia: máxima proteção a mínimo custo;
- simplicidade: mínimo de equipamentos e fiação.

2.1.1 Zonas de proteção e seletividade

A maioria dos sistemas de proteção são projetados para ter um alto grau de confiabilidade. Porém, diferente de outros equipamentos, existem duas maneiras pelas quais

os relés de proteção podem não ser confiáveis: eles podem falhar quando solicitados a operar ou eles podem operar quando não são solicitados. Desta forma, existem duas medidas para definir a confiabilidade de um sistema de proteção. A medida da certeza de que os relés operarão, para todas as faltas para as quais eles foram projetados a operar, é chamada de dependabilidade e a medida da certeza que os relés não operarão incorretamente, para qualquer falta, é chamada de segurança.

A segurança dos relés de proteção é definida em termos de regiões do sistema de energia elétrica, que são chamadas de zonas de proteção, pela qual um determinado relé ou sistema de proteção é responsável. Um relé de proteção será considerado seguro se operar apenas para faltas dentro de sua zona de proteção.

Todos os componentes do sistema de energia elétrica devem estar dentro de pelo menos uma zona de proteção (figura 2.1), sendo que uma filosofia adotada é garantir que os componentes mais importantes estejam incluídos em pelo menos duas zonas de proteção, isto é, que o componente seja protegido por dois sistemas de proteção. As zonas de proteção devem se sobrepor para garantir que nenhum equipamento fique desprotegido, mesmo que o relé principal responsável pela sua proteção falhe. Uma zona de proteção pode ser aberta ou fechada.

Em resumo, os relés de proteção são dispostos em zonas, que devem cobrir o sistema de energia elétrica por completo, de forma que nenhuma parte fique desprotegida. Quando ocorre uma falta no sistema, os relés de proteção operam, seletivamente, de forma a desligar apenas os disjuntores mais próximos ao componente protegido. Esta propriedade de desligamento seletivo, também chamada de discriminação, é obtida pela aplicação de dois métodos gerais:

- Ajuste do Tempo: os relés de proteção em zonas sucessivas são dispostos de modo que os tempos de atuação sejam ajustados para que quando ocorra uma falta, embora vários relés de proteção respondam, apenas aqueles relés associados à zona de proteção onde ocorreu a falta completem a função de desligamento;
- Sistemas Diferenciais: é possível projetar sistemas de proteção que operam apenas para faltas dentro de uma zona predefinida.

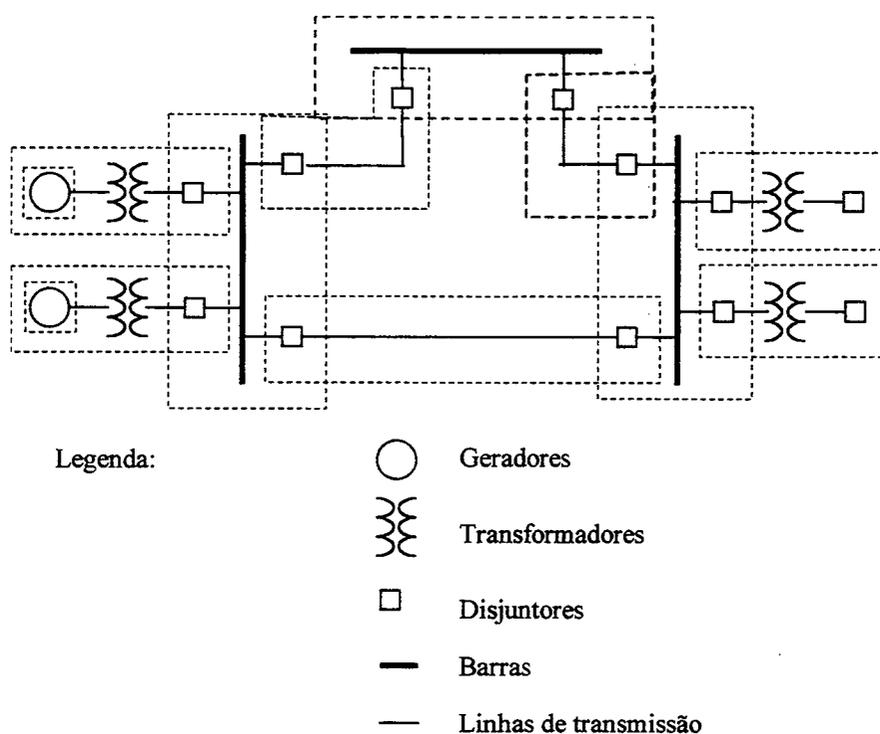


Figura 2.1 - Zonas de proteção

Qualquer que seja o método utilizado, deve-se ter em mente que a seletividade não é meramente uma questão de projeto do relé. Ela também depende da correta integração de transformadores de corrente e de potencial, e relés de proteção com ajustes adequados, levando-se em consideração variáveis como corrente de falta, corrente máxima de carga, impedâncias do sistema e outros fatores.

2.1.2 Proteção primária e retaguarda

Um sistema de proteção pode falhar e, como resultado, deixar de eliminar uma falta. Com isto, torna-se necessário utilizar sistemas alternativos de proteção que atuem e eliminem esta falta. Estes sistemas alternativos de proteção são chamados de duplicados, retaguarda ou sistemas de falha de disjuntor. O sistema de proteção principal para uma dada zona de proteção é chamado de sistema de proteção primária. Ele opera no tempo mais rápido possível e retira de operação a menor quantidade de componentes. Em sistemas de extra alta tensão é comum se utilizar sistemas de proteção primária duplicados para o caso de um elemento de uma das proteções primárias falhar. Entretanto, nem sempre é possível se duplicar cada elemento da proteção primária, neste caso, quando o custo da duplicação não for justificável, utiliza-se a proteção de retaguarda que pode ser obtida diretamente se o método de proteção utilizado for Ajuste do Tempo. Se, neste caso, ocorrer uma falta e os relés de proteção primária falharem ou ocorrer a falha do disjuntor, os próximos relés na seqüência de graduação, relés de retaguarda remota, completarão sua operação e desligarão os seus disjuntores associados.

Os relés de falha de disjuntor são um subconjunto da proteção de retaguarda local cuja função é especificamente cobrir a falha do disjuntor. O esquema de falha de disjuntor consiste de um temporizador que é energizado quando a bobina de abertura do disjuntor é energizada e é desenergizado quando a corrente pelo disjuntor desaparece, ou seja, se o disjuntor recebe um sinal de abertura e não atua dentro de um determinado período de tempo, outros disjuntores receberão sinal de abertura, de forma a isolar o que falhou.

2.1.3 Coordenação da proteção por relés

A figura 2.2 mostra um sistema radial. Cada seção necessita apenas de um disjuntor do lado da fonte. Para eliminar a falta (1) e outras faltas à direita, apenas o disjuntor na

subestação R precisa ser desligado. Para eliminar faltas em (2) e (3) e na região entre eles, o disjuntor na subestação H deve ser desligado. Do mesmo modo, para faltas em (4) e (5) e entre eles, o disjuntor na subestação G deve ser desligado.

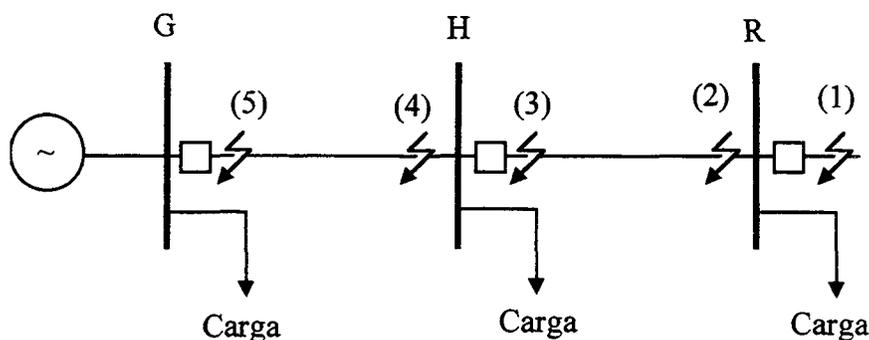


Figura 2.2 - Sistema Radial

Nenhum dos relés pode distinguir se a falta está na linha protegida, na barra remota, ou em uma linha adjacente. Os relés localizados na subestação H não podem distinguir entre as faltas (1) e (2), porque a magnitude da corrente medida em H será a mesma em ambos os casos. No entanto, a abertura do disjuntor na subestação H não é desejável para falta (1), já que haveria a interrupção da carga da subestação R sem necessidade. Para se resolver este problema utiliza-se o método de Ajuste do Tempo.

A temporização da atuação dos relés para uma falta remota permite que os relés próximos eliminem a falta pela abertura do disjuntor associado. Na figura 2.2, os relés na subestação H serão temporizados para as faltas (1) e (2). Para a falta (1), esta temporização permitirá que os relés da subestação R atuem antes dos relés da subestação H. Então, embora os relés da subestação H não atuem para a falta (1) (a não ser que ocorra a falha dos relés ou de seu disjuntor associado na subestação R), ele operará para a falta (2). Esta técnica, chamada de coordenação ou seletividade, faz com que, para faltas próximas tenhamos um

tempo mínimo de atuação e para faltas remotas tenhamos uma temporização suficiente para garantir a segurança. Na figura 2.2, por exemplo, os relés da subestação R devem coordenar com os relés à direita (não mostrados); os relés da subestação H devem coordenar com os relés em R, e os relés em G devem coordenar com os relés da subestação H.

2.2 PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DOS RELÉS

Como o propósito da proteção de sistemas de energia elétrica é detectar faltas (curtos-circuitos) ou condições anormais de operação, os relés devem ser capazes de avaliar uma grande variedade de parâmetros para estabelecer que ação corretiva é necessária. Os parâmetros mais comuns que refletem a existência de uma falta são as tensões e correntes nos terminais do componente protegido ou nos limites de sua zona de proteção. Em geral, um relé pode ser projetado para responder a qualquer efeito ou parâmetro observável. O problema fundamental em proteção de sistemas de energia elétrica é definir as grandezas que podem ser diferenciadas entre condições normais e anormais. O problema do relé distinguir entre condição normal e anormal é composto pelo fato de que *normal* no presente sentido significa que a perturbação está fora da zona de proteção.

2.2.1 Detecção de faltas

Em geral, quando ocorre uma falta, o valor da corrente aumenta e a tensão diminui. Além destas, outras mudanças podem ocorrer em um ou mais dos seguintes parâmetros: ângulos de fase, conteúdo harmônico, potência ativa e reativa, frequência, etc. Os princípios de operação, de um relé de proteção, devem estar baseados na detecção de mudanças e identificá-las como a possibilidade de que uma falta tenha efetivamente ocorrido dentro de sua

zona de proteção. Os relés de proteção estão divididos em categorias baseadas em qual destas quantidades de entrada um determinado relé responde. Desta forma, temos os relés de sobrecorrente, de sobretensão, de potência, de frequência, etc. Quanto ao princípio utilizado para detectar a falta temos [10]:

a) Detecção de nível

Este é o princípio de operação mais simples. Quase sempre o valor da corrente de falta é maior do que o valor da corrente de carga em sistemas de energia elétrica. Qualquer corrente acima de um nível ajustado pode indicar que uma falta, ou alguma outra condição anormal, existe dentro da zona de proteção. O nível para o qual o relé opera é conhecido como ajuste de *pickup* do relé. O *pickup* de um relé é o valor mínimo de operação da corrente, tensão ou qualquer outra grandeza de entrada. Para todas as correntes acima do *pickup*, o relé opera, e para correntes menores do que o valor de *pickup*, o relé não opera. É possível modificar o relé para operar para valores menores do que o valor de *pickup* e não operar para valores acima do *pickup*. Um relé de subtensão é um exemplo deste tipo de relé.

A característica de operação de um relé de sobrecorrente pode ser apresentada como um gráfico do tempo de operação *versus* a corrente no relé (figura 2.3). É mais adequado normalizar a corrente que passa pelo relé como sendo uma relação entre esta corrente e o valor de ajuste do *pickup*. O tempo de operação para correntes (normalizadas) menores que 1.0 é infinito, enquanto que para valores maiores que 1.0 o relé opera. O tempo de operação dependerá do projeto do relé, por exemplo, pode-se ter um tempo de operação que seja uma função do valor da corrente normalizada que passa pelo relé.

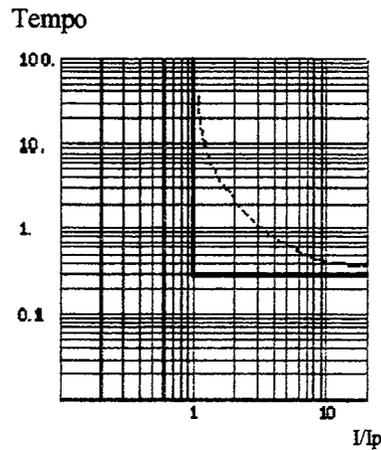


Figura 2.3 - Característica de um relé detector de nível

b) Comparação de valores

Este princípio de operação está baseado na comparação de uma ou mais grandezas de operação entre si. Por exemplo, um relé de equilíbrio de corrente (figura 2.4) pode comparar a corrente em um circuito com a corrente em outro circuito, que podem ter valores iguais ou proporcionais sob condições normais de operação. O relé operará quando a divisão de corrente nos dois circuitos variar além de uma dada tolerância. Um outro exemplo em que esta proteção pode ser utilizada é em geradores que possuam enrolamentos com duas bobinas idênticas por fase.

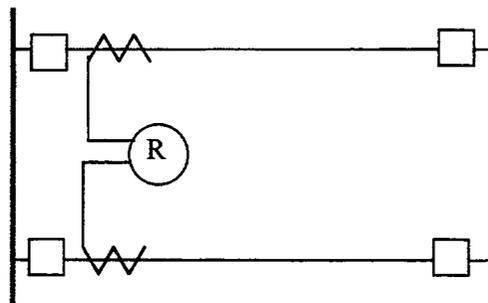


Figura 2.4 - Proteção de comparação de corrente para linhas de transmissão em paralelo

c) Comparação diferencial

A comparação diferencial é um dos métodos mais sensíveis e eficientes de garantir proteção contra faltas. O conceito de comparação diferencial é muito simples e pode ser melhor entendido observando-se o enrolamento do gerador mostrado na figura 2.5. Como o enrolamento é eletricamente contínuo, a corrente I_1 que entra por um terminal deve ser igual à corrente I_2 que sai pelo outro terminal. Pode-se usar um relé de comparação de corrente descrito acima para verificar se existe uma falta no enrolamento protegido. Quando ocorre uma falta entre os dois terminais, as duas correntes não serão mais iguais. Por outro lado, pode-se formar uma soma algébrica das duas correntes que passam pelo enrolamento protegido, isto é, $(I_1 - I_2)$, e utilizar um relé detetor de nível para identificar a presença de uma falta. Em qualquer dos casos, a proteção é denominada proteção diferencial. Em geral, o princípio diferencial é capaz de detectar valores de correntes de falta muito pequenos. Sua única desvantagem é que ele necessita das correntes das duas extremidades que definem uma zona de proteção, o que restringe sua aplicação a equipamentos como transformadores, geradores, motores, barras, capacitores, reatores, etc.

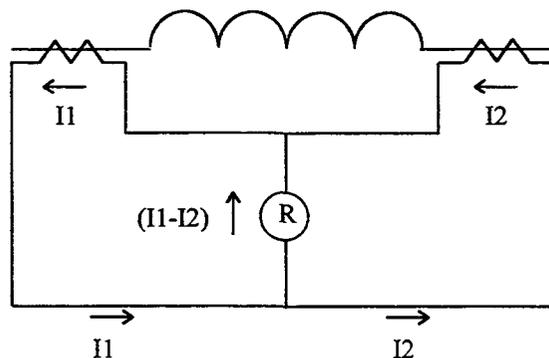


Figura 2.5 - Princípio de comparação diferencial aplicado ao enrolamento de um gerador

d) Comparação de ângulo de fase

Este tipo de relé compara a defasagem entre duas grandezas de corrente alternada. A comparação do ângulo de fase é normalmente utilizada para determinar o sentido de uma corrente com relação a uma quantidade de referência. Por exemplo, o fluxo de potência em um dado sentido define um ângulo de fase entre tensão e corrente igual ao seu ângulo de fator de potência. Quando a potência flui no sentido oposto, este ângulo será o suplemento do ângulo anterior.

e) Teleproteção

Certos princípios de proteção são baseados em informações enviadas ao relé de um terminal remoto. A informação é normalmente, mas nem sempre, na forma de estado de contatos (aberto ou fechado). A informação é enviada por um canal de comunicação usando ondas portadoras em linhas de transmissão (OPLAT), microondas ou circuitos telefônicos.

A teleproteção é utilizada para proteger linhas de transmissão quando é necessário o seu desligamento instantâneo devido a problemas de estabilidade no sistema de energia. Em geral, são utilizados dois esquemas de teleproteção: o esquema de comparação direcional e o esquema de comparação de fase. A aplicação destes esquemas leva a subclassificações, como por exemplo, permissivo ou bloqueio e sobre ou sub-alcance. O esquema de comparação direcional utiliza a comunicação de um terminal de uma linha de transmissão para o outro terminal se a falta estiver na direção da zona de proteção ou na direção oposta. O esquema de comparação de fase está relacionado com o princípio de comparação diferencial. Os ângulos de fase das correntes nos terminais da linha são comparados para determinar se a soma algébrica das correntes que entram na linha é diferente de zero.

2.2.2 Aspectos construtivos dos relés de proteção

Os relés mais antigos, conhecidos por relés eletromecânicos, que ainda se encontram em operação em grande parte das subestações e usinas, utilizam forças que são produzidas pela interação eletromagnética entre fluxos magnéticos, como em um motor elétrico. Alguns relés são baseados também na força desenvolvida pela expansão de metais causada pelo aumento de temperatura devido a passagem de uma corrente. Nos relés eletromecânicos, as forças de operação são obtidas pela combinação dos sinais de entrada e da energia acumulada em molas ou espirais. Os relés que utilizam êmbolos móveis dentro de uma bobina ou uma armadura, que é atraída pelos pólos de um eletroímã, são geralmente alimentados por uma grandeza simples de operação que pode ser alternada ou contínua. Nos relés de indução, que usam o princípio do motor de indução e onde o torque é desenvolvido em um rotor que pode ser um disco ou um cilindro (copo) de alumínio, podem ser usadas entradas simples ou múltiplas de grandezas alternadas.

A expansão e a complexidade crescente dos sistemas de energia modernos trouxeram a necessidade de relés de proteção de melhor desempenho e características mais sofisticadas. Isto foi conseguido pela aplicação dos semicondutores na construção destes relés denominados estáticos ou de estado sólido. Além das características novas ou melhoradas, outras vantagens foram auferidas com a utilização desta tecnologia, tais como: maior velocidade e sensibilidade, redução em tamanho, etc. Os relés estáticos necessitam de fonte de alimentação de corrente contínua externa já que não existem molas e torques derivados das quantidades de entrada. Os circuitos dos relés estáticos podem ser divididos em duas categorias: circuitos analógicos, que são os circuitos de medida, e circuitos de lógica digital, para a operação sobre variáveis lógicas. Hoje é possível que qualquer relé eletromecânico seja substituído por um relé estático de melhor desempenho. Todavia, existem algumas funções,

como relés de armadura para multiplicação de contatos e relés de disco de indução, que ainda são fabricados por causa da sua simplicidade.

Com o advento de microprocessadores robustos e de alto desempenho tornou-se possível aplicá-los à proteção, dando origem ao relé digital ou relé numérico. Os sinais de corrente e tensão do sistema de energia elétrica são processados por condicionadores, consistindo de circuitos analógicos tais como transdutores, circuitos supressores de surto, filtros *anti-aliasing*, etc., antes de serem amostrados e convertidos na forma digital pelo conversor analógico - digital.

Ao contrário dos relés convencionais, um relé digital possui duas partes principais: *hardware* e *software*. O tipo de *software* embutido em um relé não apenas define sua característica mas também sua função. Uma parte integrante e importante do *software* é o algoritmo, que é um conjunto de instruções matemáticas usadas para processar os sinais de entrada e estimar os parâmetros do sistema tais como valores eficazes (RMS), impedância, frequência, correntes diferenciais, etc. Estes parâmetros calculados são então utilizados para decidir se existe ou não uma falta no sistema e, em consequência, iniciar a ação necessária para isolar o componente com falta.

2.3 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR RELÉS DE DISTÂNCIA

Os relés de distância são normalmente utilizados para proteger as linhas de transmissão. Eles respondem para a impedância entre o local onde o relé está instalado e a localização da falta. Um relé de distância utiliza o princípio de comparação de valores, onde existe um equilíbrio entre tensão (V) e corrente (I), cuja razão pode ser expressa em função da impedância. Como a impedância por quilometro de uma linha de transmissão é

aproximadamente constante, pode-se dizer que estes relés respondem para a distância de uma falta na linha de transmissão, o que explica o nome aplicado a este grupo de relés. Os relés de distância operam quando a impedância complexa representada pela relação V/I é menor do que um valor conhecido dado pela impedância de ajuste (alcance do relé). Para analisar e visualizar a resposta de um relé de distância é comum utilizar um diagrama R-X.

Os relés de distância podem ser classificados, de acordo com a forma de sua característica de operação, em um diagrama R-X. Na figura 2.6 são mostrados quatro tipos gerais de relés de distância. O relé de impedância tem uma forma circular centrada na origem do diagrama R-X. O relé de admitância (ou mho) tem um formato circular que passa pela origem. O relé de reatância tem uma característica de operação definida por uma linha paralela ao eixo R. A característica quadrilateral é definida por quatro linhas retas. Formatos mais complexos podem ser obtidos por combinação lógica destas características.

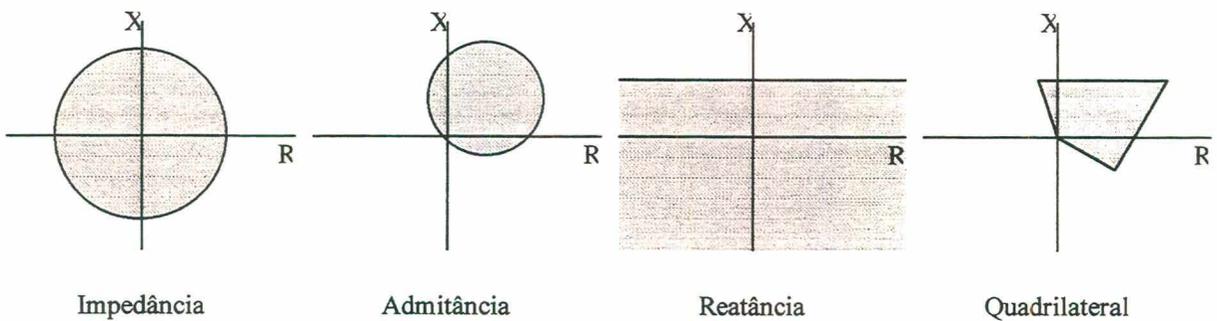


Figura 2.6 - Tipos de relés de distância

Os relés de distância são preferidos a relés de sobrecorrente porque não são tão afetados por mudanças no valor da corrente de curto-circuito quanto os relés de sobrecorrente e, por isso, são muito menos afetados por mudanças na capacidade de geração e na configuração do sistema.

A zona de um relé de distância é aberta no terminal remoto, isto é, o ponto remoto de alcance de um relé de distância não pode ser precisamente determinado e uma certa incerteza no seu alcance exato é assumida. Neste caso, a proteção de uma linha de transmissão (linha pontilhada na figura 2.7) não pode ser obtida pelo ajuste de um relé de distância na subestação A. Para se ter certeza de que o relé na subestação A não atuará para faltas fora da zona de proteção da linha de transmissão ele é normalmente ajustado para cobrir de 85% a 90% do comprimento da linha. Este ajuste é conhecido como ajuste de zona-1 do relé de distância.

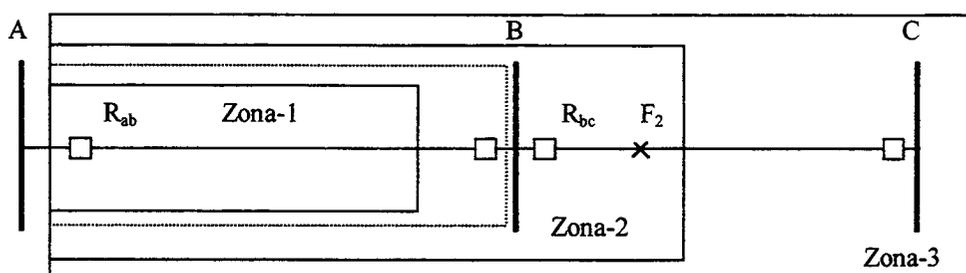


Figura 2.7 - Relé de distância com três zonas

Está claro que apenas a zona-1 não protege a linha de transmissão inteira. Por isto, o relé de distância é equipado com uma outra zona, a qual deliberadamente alcança além do terminal remoto da linha de transmissão. Esta zona é conhecida como zona-2 do relé de distância e deve ser temporizada de maneira que para faltas no próximo trecho de linha (F₂ na figura 2.7), a proteção da próxima linha opere antes da zona-2 do relé de distância em A. Esta temporização da zona-2 é denominada de intervalo de coordenação, que é o intervalo de tempo mínimo que permite que o relé de proteção primária elimine a falta dentro de sua zona de proteção, sem que haja a atuação do relé de proteção de retaguarda. O intervalo de coordenação deve considerar o tempo de abertura do disjuntor e uma margem de segurança

devido a erros no cálculo do curto-circuito, das características de operação dos relés e dos transformadores de corrente.

O intervalo de coordenação, em geral, é ajustado em de 0,4 segundos para a segunda zona e o alcance fica geralmente em torno de 120% a 150% do comprimento da linha.

Deve-se ter em mente que a zona-2 do relé de distância R_{ab} não deve alcançar além da zona-1 do relé R_{bc} , caso contrário podem existir faltas nas segundas zonas de R_{ab} e R_{bc} , o que provocaria o desligamento de ambas as linhas desnecessariamente. Este conceito de coordenação por distância e também por tempo está ilustrado na figura 2.8.

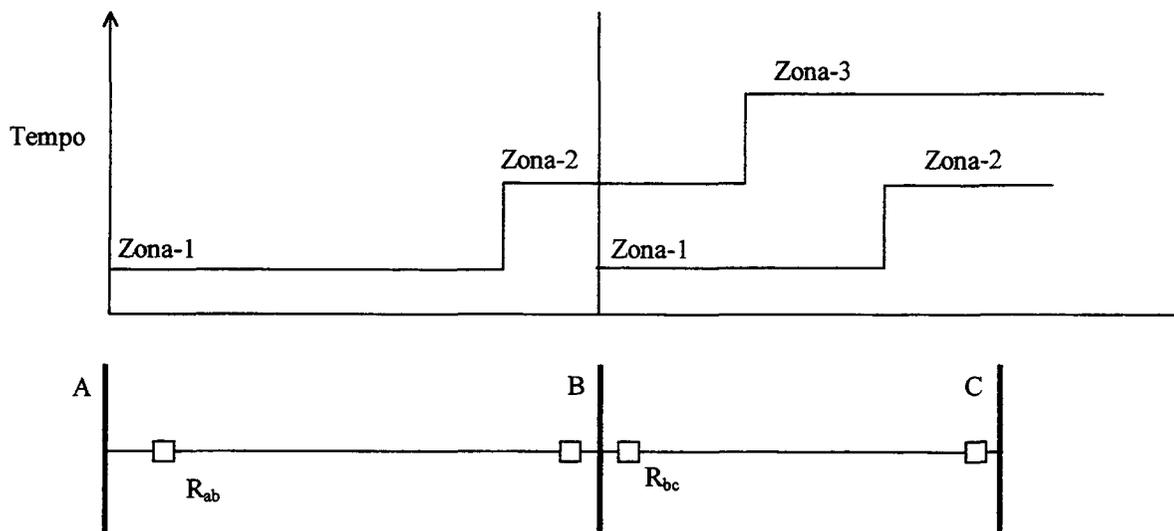


Figura 2.8 - Coordenação de relés de distância

Conforme o que foi exposto, pode-se observar que a segunda zona de um relé de distância também oferece retaguarda para o relé da linha adjacente. Porém, isto é verdadeiro para apenas uma parte da linha adjacente e depende do alcance da segunda zona. No sentido de garantir uma função de retaguarda para a linha inteira é comum acrescentar mais uma zona ao relé de distância. Esta zona é conhecida como terceira zona e normalmente alcança 150%

da linha adjacente. A terceira zona deve coordenar no tempo e distância com as segundas zonas das linhas adjacentes e o seu tempo de atuação é da ordem de 1 segundo. As três zonas de proteção do relé R_{ab} estão mostradas na figura 2.8.

2.4 PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR RELÉS DE SOBRECORRENTE

A proteção de sobrecorrente é a mais simples e barata, a mais difícil de aplicar, e a que mais rápido necessita de reajuste ou mesmo substituição quando de mudanças no sistema elétrico. Ela é geralmente utilizada para proteção de faltas para a terra e entre fases em circuitos de distribuição e em algumas linhas de subtransmissão, onde o custo da proteção de distância não se justifica. É utilizada como proteção primária de faltas à terra nas linhas de transmissão, onde relés de distância são usados para faltas entre fases, e para proteção de retaguarda de terra em linhas de transmissão com teleproteção primária.

Um relé de sobrecorrente, como o próprio nome diz, é aquele cuja grandeza característica de atuação ou de acionamento é uma corrente fornecida ao relé por meio de um transformador de corrente. Para este relé, normalmente existem dois ajustes:

- ajuste de corrente (*tap* ou *pickup*) - qualquer valor acima deste pode vir a significar que uma falta, ou alguma outra condição anormal, existe dentro da sua zona de proteção;
- ajuste de tempo (curva ou *time dial*) - caracteriza o tempo de operação do relé.

A característica de operação de um relé de sobrecorrente é apresentada como um gráfico do múltiplo do *tap versus* o tempo de operação do relé. O ajuste de curva, normalmente, varia de $\frac{1}{2}$ a 10 como pode ser observado na figura 2.9. Esta característica é conhecida como uma característica de tempo inverso.

O primeiro passo na aplicação de relés de sobrecorrente é escolher o ajuste do *pickup* do relé, de tal forma que ele opere para todos os curtos-circuitos no trecho de linha protegida e, se possível, este ajuste deve garantir proteção de retaguarda para os próximos trechos de linhas ou componentes adjacentes.

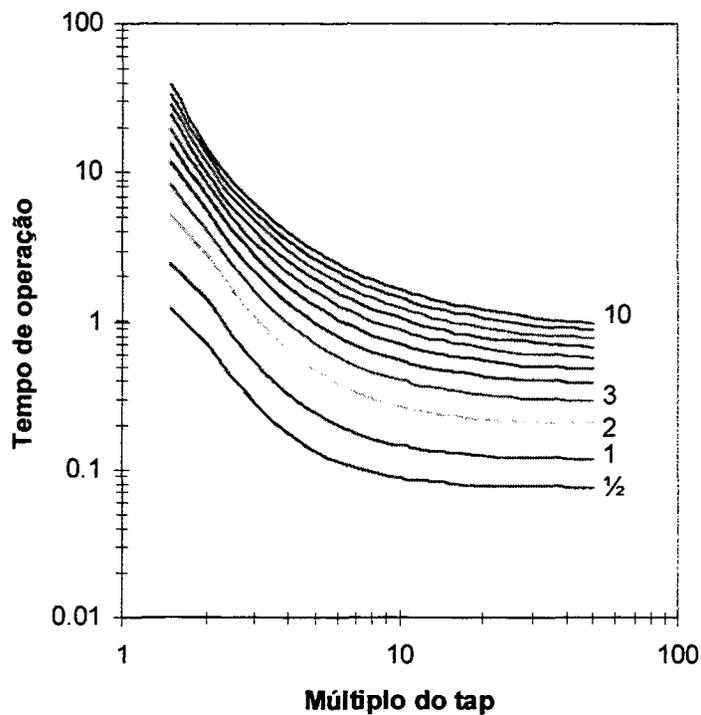


Figura 2.9 - Característica de atuação do relé CO9 (*Westinghouse*)

Por exemplo, se o elemento adjacente for um trecho de linha, o relé deve ser ajustado para operar com valor de corrente um pouco inferior ao valor da corrente para um curto-circuito no terminal remoto deste trecho de linha adjacente, sob condições de geração mínima, ou outras condições, que causariam a circulação da menor corrente no ponto de aplicação do relé. Isto está ilustrado na figura 2.10.

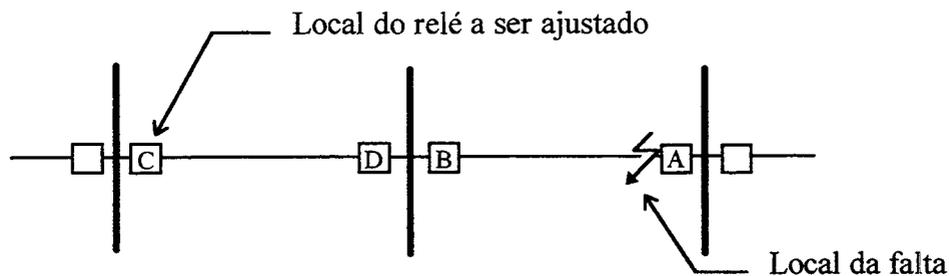


Figura 2.10 - Critério para ajuste da unidade de corrente

Devido ao efeito de circuitos paralelos, não mostrados na figura 2.10, menos corrente passará no local do relé se o disjuntor A estiver fechado. Entretanto, o relé sob consideração está sendo ajustado para operar caso o disjuntor B deixe de abrir, desta forma, se supõe, geralmente, que o disjuntor A não deixará de abrir (condição *line-end*).

O segundo passo no ajuste de relés de sobrecorrente é o ajuste da temporização para obter seletividade. Este ajuste deve ser feito para a condição na qual a máxima corrente passe pelo local do relé. Esta condição é dada para um curto-circuito imediatamente após o disjuntor em um componente adjacente, como ilustrado na figura 2.11. Sob certas condições, mais corrente passará no local do relé se o disjuntor A estiver aberto (condição *line-out*).

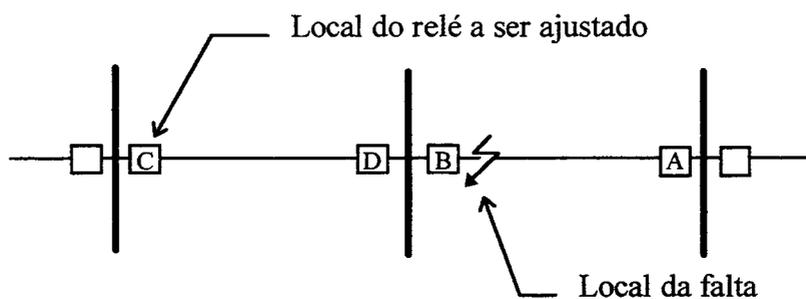


Figura 2.11 - Critério de ajuste da unidade temporizada

Alguns relés de sobrecorrente possuem ainda mais uma outra unidade de corrente, chamada de unidade instantânea. Esta unidade é utilizada quando existe uma grande redução da corrente de curto-circuito quando a falta se move para fora da zona de proteção do relé, que é o caso das linhas de transmissão. A unidade instantânea não possui nenhuma temporização adicional, o seu tempo de atuação é da ordem de 15 ms a 50 ms e ela deve ser ajustada para não ultrapassar qualquer outra zona de proteção. Com a utilização de unidades instantâneas é possível reduzir o tempo de atuação dos relés de sobrecorrente.

Pode-se adicionar uma unidade direcional ao relé para distinguir o sentido do fluxo da corrente. Em sistemas de energia elétrica com múltiplas fontes, não é possível obter uma seletividade satisfatória com a utilização de relés de sobrecorrente não direcionais, pois para defeitos atrás e na frente do relé, a corrente de curto-circuito tem valores muito próximos.

Considere a zona de proteção para a linha com fontes atrás de ambos os terminais como mostrado na figura 2.12 [21].

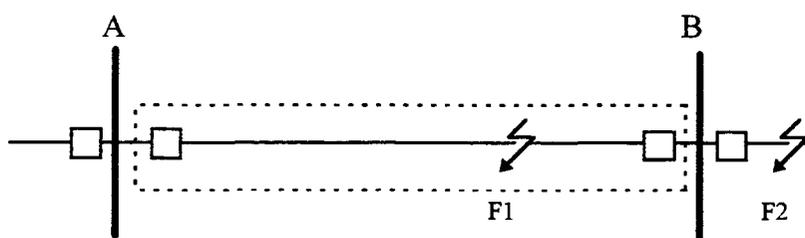


Figura 2.12 - Aplicação de relés direcionais

Nestes casos, dependendo da capacidade relativa das fontes nos dois lados, pode ocorrer que para uma falta em F1 (que está dentro da zona de proteção da linha de transmissão) a corrente que passaria pelo relé em B seja menor do que a corrente que passaria pelo mesmo relé (porém em uma direção oposta) para uma falta em F2, que está fora da zona

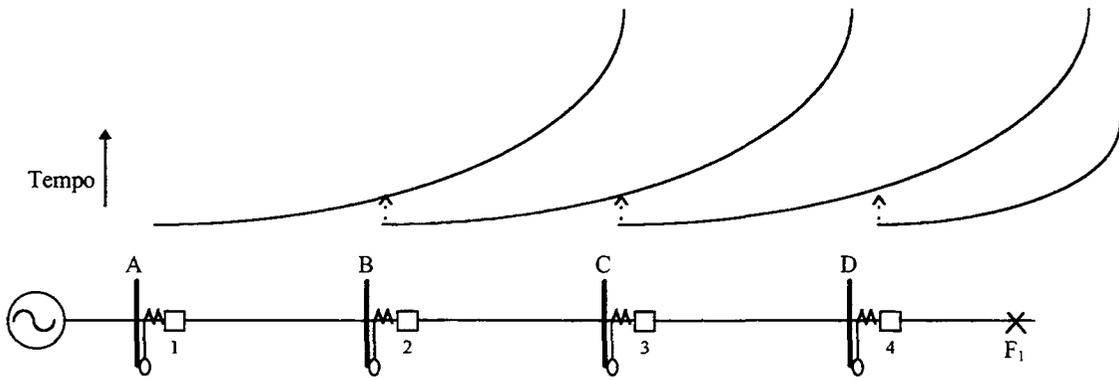


Figura 3.1 - Princípios de coordenação de relés - Sistema radial

Entretanto, esta situação simplifica o problema em demasia já que, exceto para algumas partes de sistemas de distribuição, a figura 3.1 não representa, verdadeiramente, a maioria dos sistemas reais onde anéis são a regra e circuitos radiais a exceção. Por exemplo, seja o sistema em anel mostrado na figura 3.2, onde relés de sobrecorrente direcionais são empregados nas setas com uma ponta, que mostram a direção do fluxo de corrente para a qual os relés devem operar. Nos locais “e” e 5 a corrente de falta pode fluir apenas na direção que é aquela para a qual a operação é desejada e os relés podem ser não direcionais, indicado pelas setas com duas pontas.

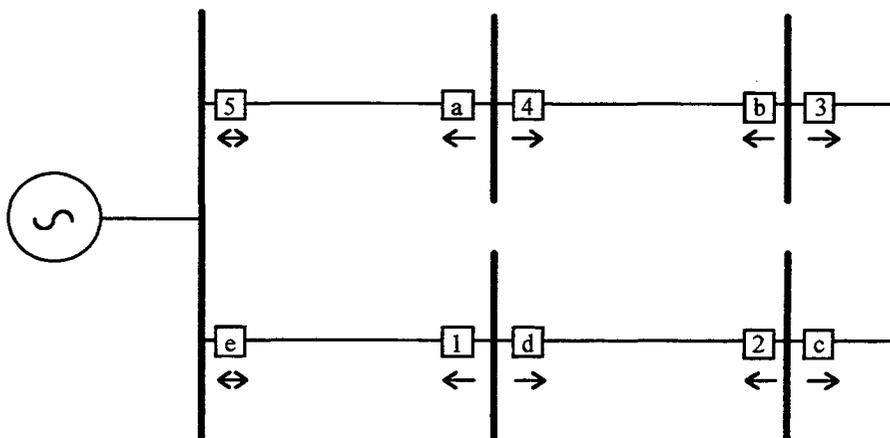


Figura 3.2 - Princípios de coordenação de relés - Sistema em anel

Em princípio, o procedimento de coordenação para relés em um anel, como o da figura 3.2, é o mesmo utilizado para os circuitos radiais, só que agora utilizando a direção de coordenação, isto é, o relé mais distante da fonte é ajustado primeiro e a seqüência inicia a partir deste relé. Desta forma, a ordem na qual os relés, percorrendo o anel no sentido horário, seriam ajustados é 1-2-3-4-5 e, percorrendo no outro sentido, é a-b-c-d-e.

A complicação do ajuste de relés de sobrecorrente em circuitos em anel aparece quando geradores (fontes) são localizados em várias usinas (subestações) em volta do anel. O problema então é onde começar. E quando circuitos de um anel fazem parte de outros anéis, o problema torna-se mais difícil. O método de tentativa e erro é o único caminho.

Seja o sistema exemplo mostrado na figura 3.3. Relés de sobrecorrente direcionais são aplicados nos disjuntores 1, 3, 4, 6, 7, 8 e 9, e cada unidade direcional opera quando a corrente está fluindo para dentro da linha.

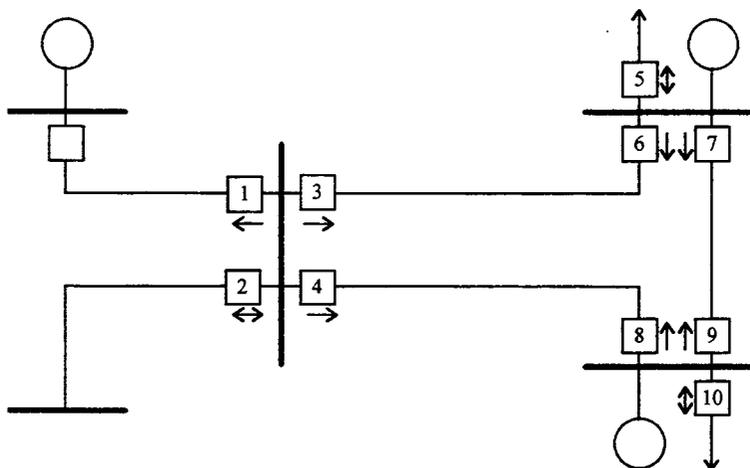


Figura 3.3 - Exemplo de sistema malhado com múltiplas fontes

Percorrendo o anel no sentido horário temos:

- o relé no disjuntor 3 deve coordenar com os relés nos disjuntores 5 e 7;
- o relé no disjuntor 7 deve coordenar com os relés nos disjuntores 8 e 10;

- o relé no disjuntor 8 deve coordenar com os relés nos disjuntores 1, 2 e 3.

Percorrendo o anel no sentido anti-horário temos:

- o relé no disjuntor 4 deve coordenar com os relés nos disjuntores 9 e 10;
- o relé no disjuntor 9 deve coordenar com os relés nos disjuntores 5 e 6;
- o relé no disjuntor 6 deve coordenar com os relés nos disjuntores 1, 2 e 4.

Como pode ser visto, os anéis não são independentes. Os ajustes em ambos os anéis dependem dos ajustes de relés em outros circuitos e ou anéis. Neste exemplo estes outros circuitos são os relés nos disjuntores 1, 2, 5 e 10 e os geradores nas barras.

A estrutura de laços do sistema de transmissão implica em um processo iterativo para ajustar todos os relés. O principal problema que um engenheiro de proteção enfrenta, no início do processo de coordenação de um sistema, é determinar os relés de partida. Devido aos laços do sistema, estes relés de partida podem ser, novamente, visitados no processo de coordenação. Desta forma, é muito importante que o número de relés de partida seja minimizado para garantir uma rápida convergência deste processo iterativo. Este conjunto mínimo de relés de partida é chamado de conjunto de abertura de laço (*break points*). Por exemplo, um conjunto mínimo de abertura de laço (não necessariamente único) para o sistema elétrico mostrado na figura 3.4 é dado pelos relés { 36, 37, 33, 32, 35}. Pode ser verificado no diagrama da figura 3.4 que este conjunto abre todos os laços do sistema.

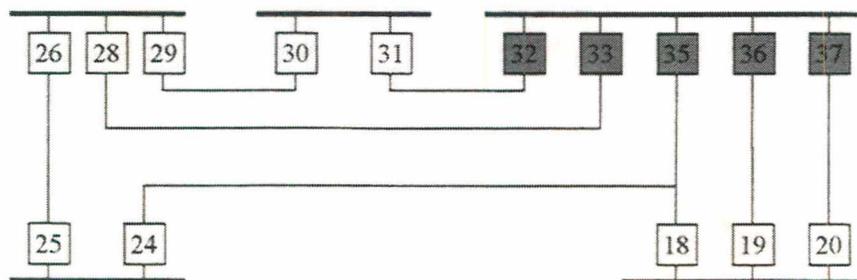


Figura 3.4 - Conjunto de abertura de laços (*break points*)

A remoção de todos os relés do conjunto de abertura de laços corta todos os laços. Isto proporciona uma seqüência eficiente para o ajuste dos relés. Esta seqüência garante que qualquer relé que seja ajustado, após os relés do conjunto de abertura de laços, tenha todos os seus relés primários já ajustados e também garante que cada relé seja visitado apenas uma vez durante uma iteração que varre todos os relés.

BAPESWARA RAO e SANKARA RAO [1] apresentaram um algoritmo baseado na teoria dos Grafos para a determinação do conjunto de abertura de laços. PRASAD et al. [22] apresentaram um algoritmo melhorado utilizando apenas a matriz de laços fundamentais do sistema. JENKIS et al. [13] aplicam o conceito de dependência funcional, que é utilizado em sistemas de bancos de dados, para a determinação do conjunto de abertura de laços.

3.2 O PROCESSO DE COORDENAÇÃO

O processo de coordenar um sistema de relés direcionais (tanto de sobrecorrente quanto de distância) envolve ajustar os relés um a um, de tal forma que, em cada estágio, o relé que está sendo ajustado esteja coordenado com todos os seus relés de proteção primária, isto é, aqueles relés localizados à frente do relé na direção de coordenação. Para cada contingência simulada no estudo de curto-circuito um coordenograma deve ser desenhado, onde a coordenação é avaliada visualmente.

Os relés de proteção de sobrecorrente devem ser coordenados em pares, utilizando-se para isso, gráficos traçados à mão em folhas transparentes com escala log-log para onde são copiadas as curvas de operação dos relés, chamados de coordenogramas (figura 3.5). Supondo que os relés já tenham sido selecionados e as relações dos transformadores de corrente já tenham sido determinadas, o processo de coordenação tem as seguintes etapas:

- a. determinação das localizações das faltas para coordenação e os respectivos valores de corrente para os tipos de falta envolvidos no processo;
- b. plotagem das correntes no papel transparente, desenhando linhas verticais nos vários valores das correntes de curto-circuito;
- c. plotagem da curva de operação do relé de proteção primária que já deve estar ajustado;
- d. escolha da curva do relé de proteção de retaguarda de modo que para o ponto onde as curvas estejam mais próximas exista uma diferença nos tempos de atuação pelo menos igual ao intervalo de coordenação necessário.

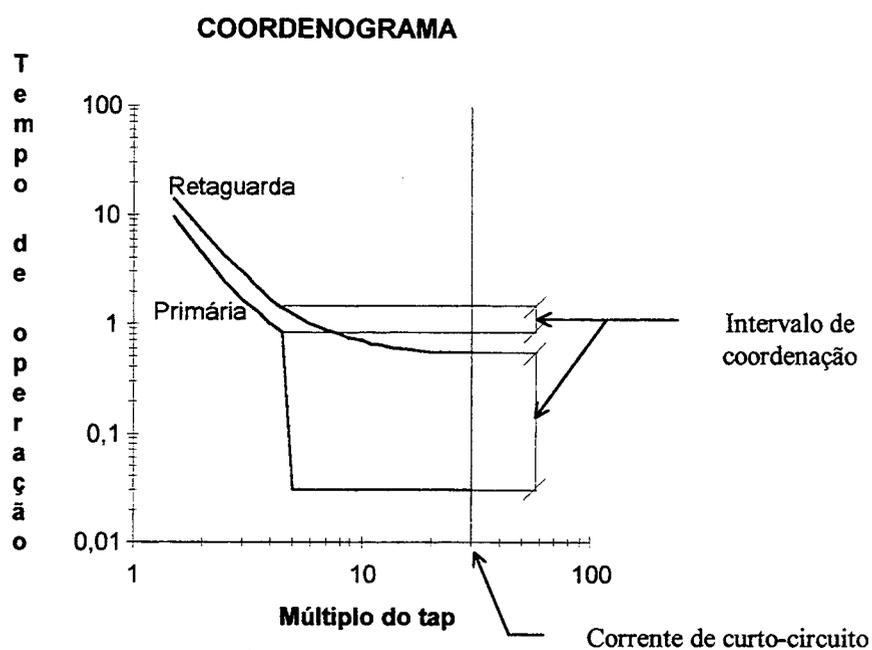


Figura 3.5 - Coordenação de relés de sobrecorrente

O intervalo de coordenação é o intervalo de tempo mínimo que permite que o relé de proteção primária elimine a falta dentro de sua zona de proteção, sem que haja a atuação do

relé de proteção de retaguarda. O intervalo de coordenação deve considerar o tempo de abertura do disjuntor e uma margem de segurança devido a erros no cálculo do curto-circuito, nas curvas de operação dos relés e do transformador de corrente.

A coordenação não deve ser verificada ou efetuada apenas no ponto de defeito que é indicado na figura 3.5 pela corrente de curto-circuito, e sim para toda a extensão das curvas dos relés, pois como pode ser observado, podem existir outros pontos onde as curvas estejam mais próximas.

Para assegurar que a grande variedade de relés de proteção existentes em um sistema de energia elétrica esteja com seus ajustes corretos, o engenheiro de proteção deve realizar estudos periódicos de curto-circuito seguidos de muitos ajustes, verificações e estudos de coordenação. Além disto, freqüentemente, existe a necessidade de se conduzir análises de perturbações para avaliar se os relés responderam corretamente para determinadas faltas.

Estas atividades envolvem o manuseio intensivo de dados que devem ser levantados antes do início das tarefas. A coordenação de relés de proteção utilizando este processo é uma tarefa tediosa, exigindo um grande número de cálculos simples e repetitivos e plotagem de curvas.

3.3 DADOS NECESSÁRIOS PARA A COORDENAÇÃO

Os dados necessários para a realização de um estudo de coordenação ou ajuste de relés de sobrecorrente de um sistema de energia elétrica são os seguintes: valores das correntes de curto-circuito, ajustes de *tap*, curva e instantâneo dos relés, relação dos transformadores de corrente e as características de operação dos relés.

Antes que o sistema de proteção possa ser estudado, é necessário um estudo completo de curto-circuito do sistema de potência. E para garantir que os ajustes finais obtidos sejam aplicáveis às mais variadas situações, um grande número de contingências deve ser simulada. Os dados de ajustes de relés são documentos enviados aos órgãos de campo para execução e, portanto, encontram-se na forma de papel arquivados em pastas. As características de operação (curvas) dos relés se encontram em um livro de curvas, que são dele copiadas por meio de um papel transparente (coordenograma).

3.3.1 Cálculo do curto-circuito

A aplicação de relés de proteção requer o conhecimento do sistema elétrico sob condições de falta, incluindo amplitudes, sentidos e distribuição das corrente de falta e, com frequência, as tensões nas localizações dos relés para várias condições de operação. Dentre estas condições de operação a serem consideradas, podemos citar a máxima e mínima geração, faltas com linhas fora de operação, faltas no final da linha com o disjuntor adjacente aberto e outras mais. Com estas informações, o engenheiro de proteção pode selecionar o tipo dos relés de proteção e ajustá-los para proteger todas as partes do sistema de energia elétrica. Os dados de curto-circuito trifásico são utilizados para a aplicação e ajuste dos relés de fase e os dados de curto-circuito monofásico para os relés de neutro.

Um sistema sob condições de curto-circuito de uma fase para terra constitui um sistema desequilibrado. Neste caso, o método das componentes simétricas é usado na determinação das correntes e das tensões. O método das componentes simétricas é fundamental no entendimento dos dados e informações de curto-circuito em sistemas de energia elétrica. Este método foi formulado por C.L. Fortescue em um artigo clássico do AIEE de 1918, e é uma das ferramentas técnicas mais poderosas do engenheiro de proteção.

Em geral, uma boa exatidão em estudos de curto-circuito pode ser obtida com uma representação simplificada da rede elétrica [27]:

- representação dos geradores por uma fonte de tensão constante atrás da reatância transitória ou subtransitória;
- são desprezados os elementos em derivação, como cargas, reatâncias capacitivas das linhas, etc.;
- todos os transformadores na relação nominal.

Em muitos estudos de curto-circuito, particularmente para sistemas de alta tensão, é suficiente representar as impedâncias de linhas de transmissão e transformadores como números reais correspondentes à sua reatância.

Inicialmente, para se realizar um estudo de curto-circuito utilizava-se um computador analógico, chamado de analisador de redes. Com o aparecimento dos computadores digitais, a análise de um sistema sob condições de curto-circuito seguiu um desenvolvimento semelhante ao do fluxo de carga, utilizando métodos iterativos. Com o surgimento de métodos para formação da matriz de impedância de barras, tornou-se possível utilizar o teorema de Thevenin para o cálculo de curto-circuito [27].

O uso da matriz de impedância de barras proporciona um meio conveniente de calcular as correntes e tensões de curto-circuito quando a terra é adotada como barra de referência. Os elementos da diagonal da matriz de impedância de barras são as impedâncias próprias da barra com relação à barra de referência e os elementos fora da diagonal são as impedâncias de transferência entre cada barra do sistema em relação às outras barras. As impedâncias de transferência representam as tensões que existiriam em cada uma das outras barras do sistema, com relação à referência, quando uma barra particular recebe uma injeção de corrente de uma unidade [3].

A análise completa de curto-circuito de um sistema pode ser feita por simples operações aritméticas, assim que as tensões dos nós tenham sido determinadas.

Na análise de curto-circuito trifásico, o comportamento do sistema é estabelecido pela matriz de seqüência positiva de impedância de barras. Para condições de curto-circuito desequilibrado os três circuitos de seqüência (positiva, negativa e zero) são conectados de maneira a atender as condições da falta. Geralmente na análise dos sistemas de energia elétrica, o circuito de seqüência negativa é considerado idêntico ao circuito de seqüência positiva.

Existem dois métodos de armazenar, no computador, as informações da matriz de impedância de barras. O primeiro método envolve o cálculo e o armazenamento dos valores das matrizes de seqüência de impedância de barras, ou pelo menos de um subconjunto esparsos destas matrizes. A segunda alternativa, para o cálculo dos equivalentes de Thevenin, é armazenar as matrizes de seqüência de admitância de barras na forma fatorada.

Atualmente, pela aplicação de técnicas de esparsidade com métodos de compensação, utilizando as matrizes de admitância de barras, o desempenho computacional dos programas de curto-circuito melhorou consideravelmente.

3.3.2 Características de operação dos relés de sobrecorrente

Existem dois métodos principais para a representação das características de operação de relés de sobrecorrente em programas computacionais: por pontos e por funções. O método de representação por pontos calcula o tempo para qualquer corrente efetuando-se uma simples interpolação entre os pontos e tem uma boa exatidão. Já o método por funções descreve o tempo de atuação do relé como uma função matemática da corrente, que é obtida a partir ou da interpolação por polinômios ou por métodos de regressão tal como o de

mínimos quadrados. A principal desvantagem deste método está na falta de exatidão dos valores obtidos.

O relatório do IEEE, Representação das características de relés de sobrecorrente em computador [12], discute a possibilidade de se armazenar os dados de características de operação de relés digitalizados em forma de tabelas e a representação das curvas usando um número mínimo de constantes.

SACHDEV, SINGH e FLEMING [25] mostraram as representações utilizadas antes de 1978 e suas limitações e propõem três equações alternativas. CHAN E MAURER [5] propõem um novo método para criação e edição das curvas, utilizando curvas cúbicas para representar seções das curvas.

Os dados de característica de operação dos relés de sobrecorrente, utilizados neste trabalho, foram levantados em 1988 e fazem parte de um outro programa computacional desenvolvido anteriormente para a verificação da coordenação e ajuste de relés de sobrecorrente de transformadores [17]. Estes dados estão armazenados em um arquivo no formato dBase III[®] que tem a seguinte estrutura:

- nome do relé de sobrecorrente ou religador;
- nome da curva ou característica de operação;
- tempo de restabelecimento do relé de sobrecorrente;
- 25 tempos de atuação, para múltiplos da corrente de operação preestabelecidos.

As curvas de operação dos relés de sobrecorrente são armazenadas por pontos, sendo que para cada curva foram levantados 25 tempos de atuação para múltiplos da corrente de operação preestabelecidos. Cada relé de sobrecorrente é composto de 11 curvas padrão que vão de $\frac{1}{2}$ a 10. Isto foi adotado para que o programa possa obter valores intermediários, por exemplo a curva 5,5, através de uma interpolação.

Entre relés e religadores, existem cadastrados no banco de dados, 32 dispositivos diferentes. O espaço total ocupado pelo banco de dados é de aproximadamente 90kbytes, incluindo o arquivo de índice.

3.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O relatório do IEEE sobre coordenação da proteção de linhas com auxílio do computador [11], que investigou a aplicação de computadores na tarefa de ajuste e verificação dos ajustes das proteções de linhas de transmissão, traz uma vasta bibliografia contendo a maioria dos trabalhos publicados nesta área até 1988, e apresenta a definição completa de um sistema computacional para auxílio na coordenação de esquemas de proteção de linhas de transmissão.

Na área de programas computacionais para auxílio em estudos de coordenação de relés de proteção a bibliografia pode ser dividida em três grandes grupos: algorítmicos, sistemas especialistas e otimização.

3.4.1 A coordenação por algoritmos

A maioria das pesquisas iniciais estavam baseadas em programas computacionais utilizando sistemas operacionais de submissão de trabalhos. Neste tipo de programa, o engenheiro de proteção fica isolado da máquina durante o processo de coordenação, impedindo que a experiência do engenheiro de proteção seja utilizada no processo. Os métodos interativos foram então empregados para colocar o engenheiro de proteção no controle e guiar o processo de solução. Porém este tipo de metodologia iniciava o processo de coordenação a partir de relés arbitrários e prosseguia para os outros relés um por um até

que todos os relés estivessem coordenados. Este tipo de método envolve um grande número de iterações até que se consiga um resultado [11].

O livro *Applied Protective Relaying* [30], da *Westinghouse*, apresenta o Programa de Coordenação de Dispositivos de Proteção, cujo diagrama de blocos pode ser visto na figura 3.6.

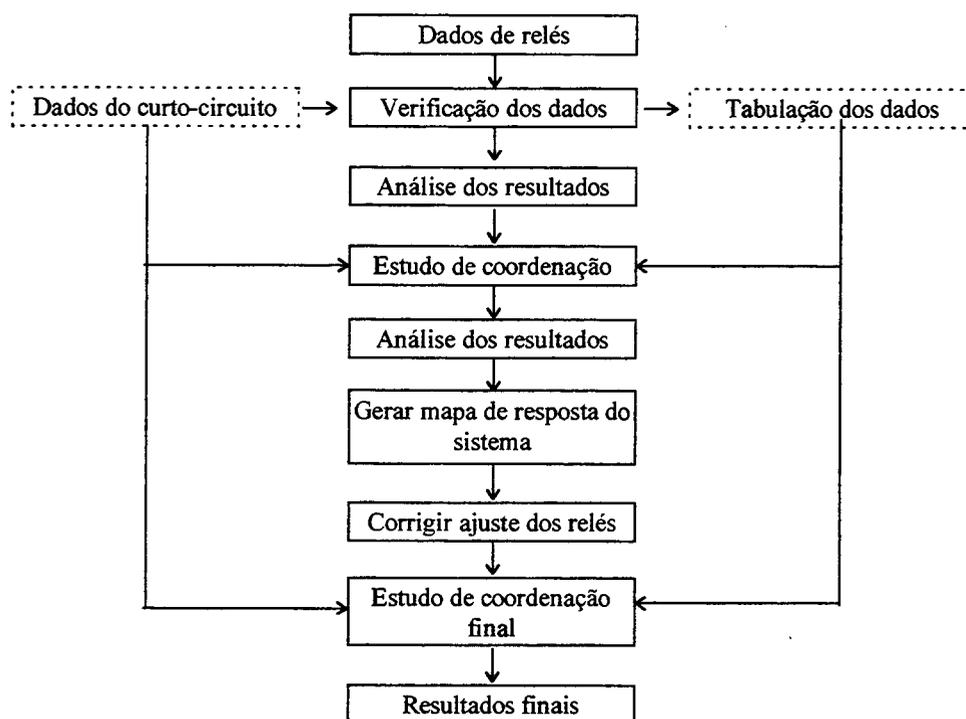


Figura 3.6 - Diagrama de blocos do procedimento de coordenação

Os blocos principais deste procedimento são: o bloco de verificação dos dados, onde o programa avalia a eficiência dos relés e ajustes e, se necessário, recomenda dispositivos de proteção alternativos; o bloco de estudo de coordenação, onde o programa estabelece os ajustes e os dispositivos de proteção para otimizar a coordenação e finalmente, o bloco de coordenação final que mostra como o sistema se comportará com os ajustes calculados. O mapa de resposta do sistema determina o caminho crítico de coordenação, que são os pares

de proteção primária/retaguarda com as menores diferenças entre suas características de operação. Este caminho de coordenação auxilia a identificação de problemas sérios de coordenação e indica ao engenheiro de proteção os efeitos destes problemas no desempenho global do sistema.

MADHAVA RAO [19], em seu livro *Power System Protection*, apresenta um exemplo de um programa de coordenação com a ajuda de computador. Para uma dada configuração do sistema, este programa faz os cálculos de curto-circuito necessários e toma decisões lógicas para aplicar, ajustar e verificar todos os relés do sistema. O fluxograma do programa está apresentado na figura 3.7.

O programa faz a seleção preliminar dos relés (isto é, determina o tipo do relé a ser usado se não for especificado) e estabelece ajustes preliminares para todos os relés no sentido de garantir pontos de partida para as funções subsequentes. A partir dos dados de entrada, o programa gera os pares de relés para coordenação e seus pares de corrente associados pela procura nos dados de falta já armazenados. Quando todos os relés tiverem seus ajustes calculados de tal forma que eles estejam coordenados com todos os outros no sistema, é impressa uma listagem contendo as localizações dos relés, os tipos, os ajustes finais e o tempo de operação para cada relé.

Atualmente existem programas comerciais disponíveis no mercado, como é o caso do WESCARGO [2], CAPE [8, 23, 24], V-PRO [14] e RELAY-PC [6].

3.4.2 A coordenação por técnicas de otimização

As técnicas de otimização foram aplicadas para obter ajustes ótimos dos relés. O problema da coordenação dos relés de proteção é formulado como um problema de programação linear que minimiza uma função objetivo dos tempos de atuação dos relés de

proteção sujeito a restrições do critério de coordenação, faixa de ajustes dos relés e suas características de operação. Neste tipo de implementação não é necessária a determinação do conjunto de abertura de laços, apenas os pares de relés de proteção primária e retaguarda.

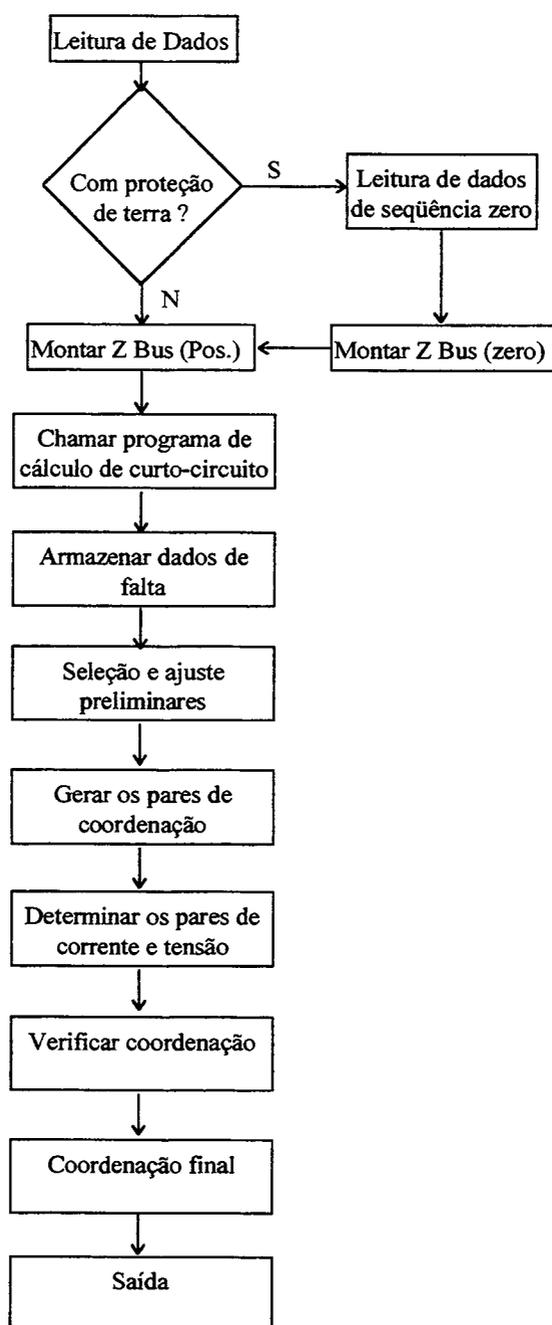


Figura 3.7 - Fluxograma de um programa de coordenação

URDANETA et al. [28, 29 ,30], em seus três artigos, apresentam uma metodologia que otimiza o ajuste de tempo (curva) de relés direcionais de sobrecorrente usando o método Simplex, otimiza o ajuste de corrente (*tap*) usando a técnica de gradiente reduzido e aplica esta técnica para subsistemas, bem como para mudanças na topologia da rede. LAWAY e GUPTA [18] expressam o problema de coordenação como um problema de otimização paramétrica e integram ao programa o fluxo de carga, o curto-circuito e a determinação dos pares de coordenação. ELRAFIE e IRVING [7] aplicam o método de programação linear com relaxação das restrições ao problema de coordenação e comparam os resultados obtidos com um programa algorítmico. Mais recentemente, SO, LAI e FUNG [26] descrevem um método para coordenação de relés de sobrecorrente baseado em Algoritmos Genéticos. Cada cromossomo consiste de um conjunto com todos os ajustes de tempo e corrente dos relés. A função objetivo é proporcional ao somatório dos tempos de atuação dos relés e dos desvios quadráticos de valores fornecidos pelo usuário, dos *taps*, das curvas e dos intervalos de coordenação.

A representação das características de operação dos relés de sobrecorrente é o ponto chave para a aplicação da programação linear ao problema de coordenação. Nos artigos que utilizam este algoritmo nenhuma menção é feita ao ajuste ótimo da unidade instantânea.

3.4.3 A coordenação por sistemas especialistas

Outra metodologia adotada na solução do problema de coordenação é a aplicação de sistemas especialistas baseados em regras.

HONG et al. [9] apresentaram um sistema especialista que ajuda os engenheiros de proteção a corrigir descoordenações em sistemas de distribuição (radiais). O sistema esperto avalia a causa das descoordenações e sugere correções com prioridades. MADKOUR e EL-

SAYED [20] desenvolveram um sistema especialista para ajuste de relés de distância com bases de conhecimento organizadas em *frames* utilizando a linguagem Prolog. KAWAHARA, SASAKI e SUGIHARA [16] apresentaram um programa para ajuste de relés direcionais de sobrecorrente. Na sua implementação o conjunto mínimo de relés de partida deve ser determinado, a fim de reduzir o número de iterações. A determinação do conjunto de abertura de laços e da seqüência de ajuste dos relés é feita por meio de regras heurísticas. Os ajustes dos relés e sua coordenação são também determinados utilizando-se regras formadas a partir da experiência de especialistas.

3.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o problema da coordenação de relés de sobrecorrente e os dados necessários para sua realização. Outro item importante foi a revisão bibliográfica que indica como se encontra hoje e quais os princípios utilizados no desenvolvimento de programas computacionais para o auxílio no processo de coordenação de relés de sobrecorrente.

Na grande maioria das referências as curvas de operação dos relés de sobrecorrente são representadas na forma de equações polinomiais e o cálculo do curto-circuito é feito de forma independente do programa principal e os valores calculados das correntes são armazenados, geralmente em um banco de dados, para posterior utilização. A coordenação é verificada apenas nos pontos de falta especificados nos critérios de ajuste embutidos nos programas.

A maioria dos trabalhos citados desenvolvem programas para ajuste de relés de proteção e a interação com o engenheiro de proteção se dá após a obtenção dos ajustes de

todos os relés do sistema ou subsistema elétrico. Este tipo de ferramenta necessita que os critérios para ajuste sejam estabelecidos *a priori*. Quando se deseja que um determinado relé não obedeça a estes critérios ou que seus ajustes não sejam alterados pelo programa, esta informação deve ser fornecida ao programa de ajuste, e por isto, este tipo de ferramenta não utiliza toda a potencialidade do engenheiro de proteção. Estes programas têm por finalidade a chamada proteção adaptativa que se refere à capacidade do sistema de proteção alterar automaticamente seus ajustes para mudanças no sistema de energia de forma a manter um desempenho ótimo. Isto implica que os relés de proteção devem ter capacidade de comunicação e que o cálculo e a transmissão dos novos ajustes deve ser feito em tempo real. Entretanto, a utilização deste tipo de ferramenta na área de estudos de proteção e com relés sem capacidade de comunicação, que são a grande maioria, obrigaria o deslocamento de equipes de campo por todo o sistema elétrico para a implantação dos novos ajustes. Esta característica pode chegar a inviabilizar a utilização de tais ferramentas para o ajuste de relés de proteção.

O programa desenvolvido neste trabalho pretende apenas facilitar a tarefa do engenheiro de proteção sem interferir no processo de ajuste, deixando os critérios de coordenação e as localizações das faltas sob responsabilidade do engenheiro.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTAÇÃO DO PROGRAMA

4.1 INTRODUÇÃO

O programa computacional para verificação da coordenação e auxílio na determinação dos ajustes de relés direcionais de sobrecorrente de neutro de linhas de transmissão foi desenvolvido no ambiente Visual Basic® que consiste de um sistema de programação que é utilizado para escrever aplicações orientadas a eventos. A programação em resposta a eventos, tais como pressionar uma tecla ou apertar o botão de um *mouse*, torna fácil criar aplicações que têm apelo visual e são simples de usar.

Em um ambiente de programação tradicional, os usuários devem entrar a informação em uma ordem determinada pelo programador da aplicação. As aplicações em Visual Basic, que são orientadas a eventos, permitem aos usuários controlar como eles entram a informação. Com o Visual Basic é muito fácil criar aplicações dentro do sistema operacional Microsoft Windows.

O Visual Basic oferece muitas ferramentas que podem ser utilizadas no desenvolvimento de interfaces gráficas. Uma aplicação em Visual Basic é baseada em um projeto que é a coletânea de formulários, módulos e controles personalizados. Um formulário inclui os controles e o código associado aos eventos do formulário. Quando é necessário compartilhar código dentro do projeto, o código é colocado em um módulo. Os controles são

ferramentas tais como caixas, botões, e etiquetas que são desenhadas em um formulário para obter entrada de dados ou mostrar a saída de informações.

Os formulários servem como a interface da aplicação. Cada formulário é uma janela que contém controles, gráficos ou outros formulários. Os formulários podem ser usados de muitas maneiras diferentes:

- como uma tela ilustrada de introdução de uma aplicação;
- como uma caixa de diálogo;
- como um documento em uma aplicação; etc.

Essencialmente, o programa de que trata esta dissertação consiste na integração de um programa de curto-circuito com os dados de ajuste e localização dos relés no sistema elétrico para a verificação da coordenação e plotagem do coordenograma de qualquer par de proteção primária/retaguarda. Então, é lógico que existe um programa para cálculo dos valores das correntes de curto-circuito embutido nesta aplicação que está descrito na seção 4.2. Existe também todo o tratamento dos dados de ajuste e localização dos relés que pode ser visto na seção 4.3 e a verificação da coordenação que é tratada na seção 4.4. Finalmente, na seção 4.5 está descrito como funciona a interface homem - máquina e na seção 4.6 são apresentados alguns exemplos de utilização do programa.

4.2 CÁLCULO DO CURTO-CIRCUITO

4.2.1 Dados de entrada

A entrada dos dados para o cálculo de curto-circuito utiliza um arquivo tipo texto onde devem estar incluídos os dados de ramos, os dados de barras e os dados de impedâncias mútuas. Os registros com os dados de ramo devem vir após um registro contendo apenas o

valor 37 nas colunas 2 e 3. Depois do último registro com os dados de ramo deve vir um registro com 9999 nas colunas de 1 a 4. O formato dos registros com os dados de ramo está mostrado na tabela 4.1.

COLUNA	CONTEÚDO
1 a 4	Número da barra inicial do ramo.
9 a 12	Número da barra final do ramo.
16	Número do circuito do ramo.
24 e 29	Reatância de seqüência positiva do ramo em % na base de 100 MVA e com ponto decimal assumido entre as colunas 27 e 28.
36 a 41	Reatância de seqüência zero do ramo em % na base de 100 MVA e com ponto decimal assumido entre as colunas 39 e 40.

Tabela 4.1 - Formato dos dados de ramos

Os registros com os dados de barra devem ser seguidos de um registro contendo apenas o valor 38 nas colunas 2 e 3. Após o último registro com dados de barra deve haver um registro com 9999 nas colunas de 1 a 4. O formato dos registros com os dados de barra está mostrado na tabela 4.2.

COLUNA	CONTEÚDO
1 a 4	Número da barra, podendo variar de 1 a 9998.
10 a 21	Nome da barra.
18 a 20	Tensão nominal da barra em kV

Tabela 4.2 - Formato dos dados de barras

Os registros com os dados de acoplamento mútuo devem vir após um registro contendo apenas o valor 39 nas colunas 2 e 3. Após o último registro com os dados de

acoplamento mútuo deve vir um registro com 9999 nas colunas de 1 a 4. O formato dos registros com os dados de acoplamento mútuo está mostrado na tabela 4.3.

COLUNA	CONTEÚDO
1 a 4	Número da barra inicial do primeiro ramo do acoplamento mútuo.
9 a 12	Número da barra final do primeiro ramo do acoplamento mútuo.
15	Número do circuito do primeiro ramo do acoplamento mútuo.
17 a 20	Número da barra inicial do segundo ramo do acoplamento mútuo.
25 a 28	Número da barra final do segundo ramo do acoplamento mútuo.
31	Número do circuito do segundo ramo do acoplamento mútuo.
39 a 44	Parte reativa da impedância de acoplamento mútuo, em %, na base de 100 MVA e com ponto decimal assumido entre as colunas 42 e 43.

Tabela 4.3 - Formato dos dados de acoplamento mútuo

4.2.2. Montagem das matrizes de rede

A partir dos dados de impedâncias dos componentes da rede são formadas as matrizes de seqüências positiva e zero de impedância primitiva, que são armazenadas na mesma estrutura esparsa. Estas matrizes são então ordenadas e fatoradas.

As matrizes de seqüências positiva e zero de admitância de barras são formadas por inspeção. Na montagem da matriz de seqüência zero, calcula-se a coluna da matriz inversa da matriz de impedância primitiva, que é a coluna da matriz de admitância primitiva, por substituição direta e inversa, correspondente à linha que está sendo processada, e as admitâncias mútuas são incluídas conforme o circuito equivalente da figura 4.1. Com este

procedimento elimina-se a necessidade do tratamento de grupos de linhas de transmissão mutuamente acopladas.

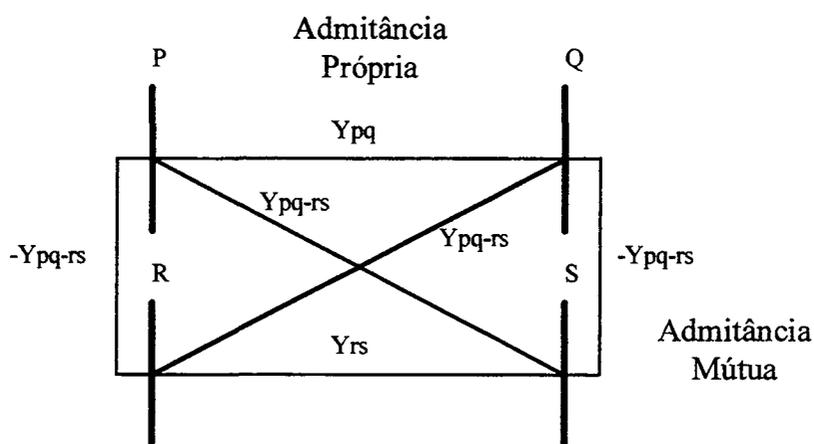


Figura 4.1 - Circuito equivalente para linhas mutuamente acopladas

As matrizes de seqüências positiva e zero de admitância de barras utilizam também a mesma estrutura esparsa e são ordenadas e fatoradas.

4.2.3 Cálculo das contingências

No decorrer de um estudo completo de faltas é desejável abrir as linhas ligadas a uma barra em condição de falta. As simulações das contingências utilizam o método de compensação. A simulação da contingência de abertura de uma linha (condição *line-out*, figura 4.2) é simulada pela inclusão de uma linha na faixa de passagem com o negativo da impedância da linha original, mas com acoplamentos mútuos iguais aos da linha original que está sendo aberta (Apêndice B). A simulação da contingência de curto-circuito no final da linha (condição *line-end*, figura 4.2) é simulada, após a simulação de retirada da linha, pela

inclusão de uma linha radial com os mesmos acoplamentos mútuos. Estes procedimentos foram originalmente empregados na construção da matriz de impedância de barras [3].

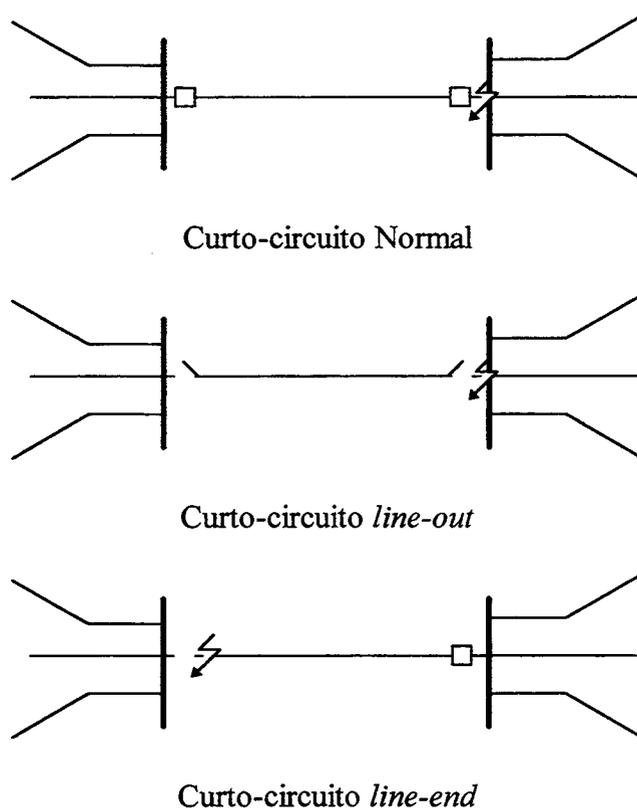


Figura 4.2 - Contingências

4.2.4 Testes realizados

Foi utilizado para teste o sistema elétrico da Companhia Paranaense de Energia (767 barras e 1432 linhas) e os resultados foram comparados com o programa de curto-circuito atualmente utilizado pela Companhia, tendo apresentado resultados iguais. O número de circuitos com acoplamento mútuo é de 159, produzindo 54 grupos de circuitos mutuamente acoplados, com um total de 755 elementos nas matrizes de acoplamento mútuo.

O Sistema de Transmissão da COPEL (figura 4.3) é composto por mais de 6100 km de Linhas de Transmissão e de 107 Subestações de 69 a 525 kV, abrangendo regiões rurais, urbanas e litorâneas, como mostrado na tabela 4.4.

Subestações	NÚMERO			POTÊNCIA - MVA		
	Acumulado até			Acumulado até		
	MAR/98	MAR/97	%	MAR/98	MAR/97	%
500 kV	2	2	-	3.192	3.192	-
230 kV	18	18	-	5.738	5.043	13,8
138 kV	58	49	18,4	3.501	2.941	19,0
69 kV	29	33	-12,1	1.435	1.667	-13,9

Tabela 4.4 - Subestações da COPEL

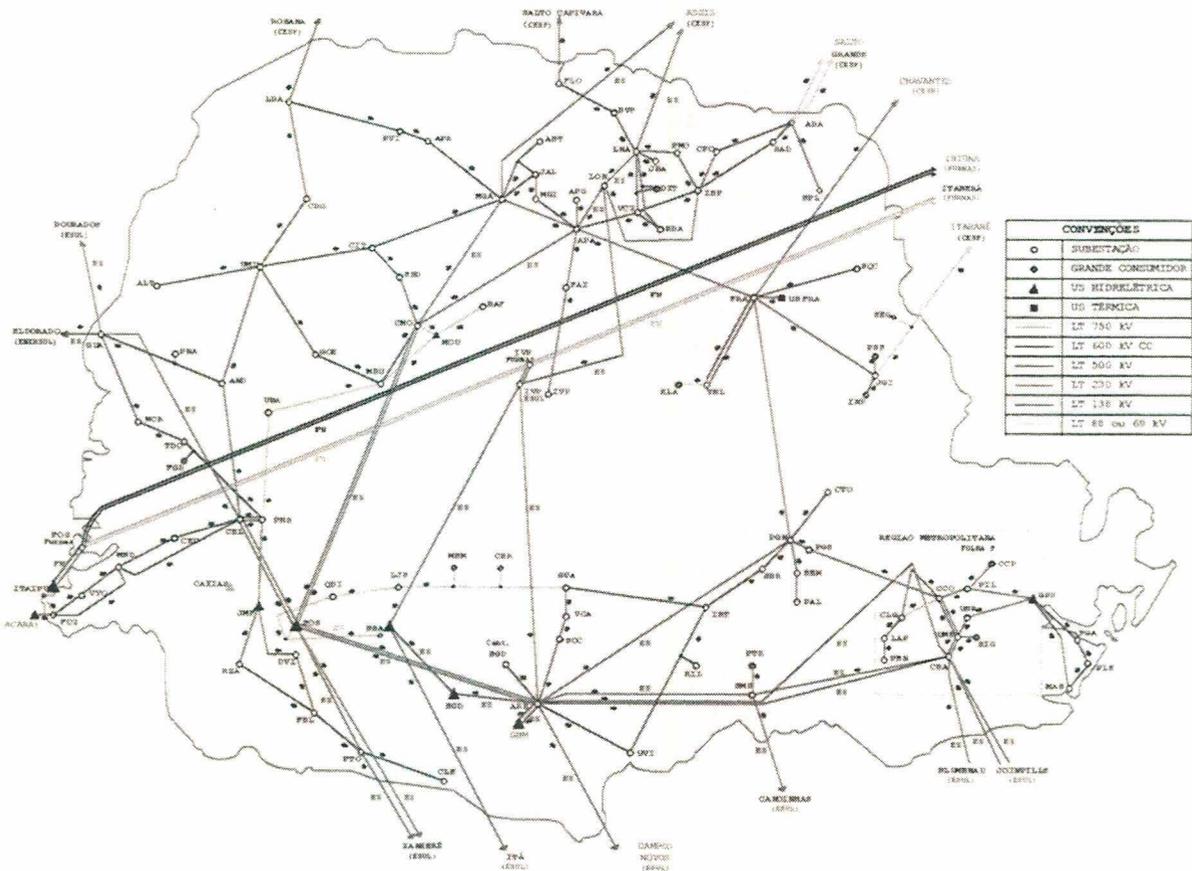


Figura 4.3 - Sistema de transmissão do Paraná

A tabela 4.5 mostra os valores, em por unidade, calculados pelo programa desenvolvido neste trabalho e os valores do programa para cálculo de curto-circuito oficial, utilizado na COPEL, para curtos-circuitos trifásicos e monofásicos em alguns barramentos do sistema elétrico da COPEL. Como pode ser observado, os valores são iguais.

No.BARRA	CC. Trifásico		CC. Fase-terra	
	Calculado	Oficial	Calculado	Oficial
1	10.8	10.8	11.0	11.0
3	2.9	2.9	3.9	3.9
4	2.8	2.8	3.7	3.7
7	2.0	2.0	0.7	.7
11	13.8	13.8	13.6	13.6
13	1.9	1.9	0.6	.6
18	5.7	5.7	5.8	5.8
20	1.7	1.7	0.0	0.0
24	11.3	11.3	11.9	11.9
26	2.0	2.0	0.7	.7
28	2.1	2.1	0.7	.7
34	6.5	6.5	5.7	5.7
40	13.4	13.4	13.9	13.9
41	2.0	2.0	0.7	.7
42	2.0	2.0	0.7	.7
48	17.2	17.2	18.0	18.0
54	2.0	2.0	0.7	.7
64	10.7	10.7	9.1	9.1
65	10.4	10.4	8.6	8.6
72	12.1	12.1	11.8	11.8
73	11.0	11.0	10.2	10.2
74	13.6	13.6	13.2	13.2
76	13.7	13.6	13.3	13.3
77	13.4	13.4	12.9	12.9
78	1.1	1.1	0.0	.0
81	41.9	41.9	43.9	43.9
83	17.8	17.8	23.0	23.0
85	19.6	19.6	25.4	25.4
87	20.3	20.3	26.3	26.3
89	4.2	4.2	0.0	.0
91	4.3	4.3	0.0	.0
93	2.3	2.3	0.7	.7
95	2.3	2.3	0.7	.7
103	6.3	6.3	7.0	7.0
105	1.7	1.7	2.3	2.3

No.BARRA	CC. Trifásico		CC. Fase-terra	
	Calculado	Oficial	Calculado	Oficial
107	2.4	2.4	3.3	3.2
109	1.6	1.6	2.1	2.1
111	2.4	2.4	3.2	3.2
113	1.1	1.1	0.6	.6
115	1.8	1.8	0.6	.6
119	13.8	13.8	14.4	14.4
121	2.6	2.6	0.9	.9
123	2.6	2.6	0.9	.9
127	9.8	9.8	10.7	10.7
129	2.6	2.6	0.9	.9
131	2.4	2.4	0.9	.9
137	3.3	3.3	3.6	3.6
141	1.7	1.6	2.0	2.0
147	1.2	1.2	0.2	.2
149	0.6	.6	0.7	.7
153	14.7	14.7	14.7	14.7
155	2.0	2.0	0.7	.7
157	2.0	2.0	0.7	.7
161	8.2	8.2	7.4	7.4
163	1.4	1.4	0.0	.0
167	5.8	5.8	5.7	5.7
169	1.8	1.8	0.7	.7
180	11.9	11.9	13.2	13.2
182	4.5	4.5	0.0	.0
185	13.8	13.8	13.4	13.4
186	12.8	12.8	11.6	11.6
187	1.0	1.0	0.3	.3
193	24.0	24.0	27.3	27.3
195	9.1	9.1	11.4	11.4
197	0.7	.7	0.9	.9
199	9.9	9.9	11.7	11.7
201	9.9	9.9	11.7	11.7
203	9.9	9.9	11.7	11.6
205	9.8	9.8	11.6	11.6
207	9.4	9.4	12.0	12.0

Tabela 4.5 - Comparação de valores de curto-circuito, em por unidade

4.3 DADOS DE AJUSTE DOS RELÉS

4.3.1 Entrada de dados

Os dados de ajuste dos relés de proteção utilizam um arquivo tipo texto e cujo formato está mostrado na tabela 4.6.

COLUNA	CONTEÚDO
1 a 4	Número da barra onde está instalado o relé.
9 a 12	Número da barra final do ramo onde está instalado o relé, o ramo deve fazer parte dos dados de linha.
15	Número do circuito do ramo.
18 a 22	Função do relé de proteção.
23 a 27	Nome do relé conforme cadastro.
28 a 33	Ajuste de corrente do relé em ampères secundários.
34 a 39	Ajuste de tempo do relé .
40 a 45	Ajuste da unidade instantânea do relé em ampères secundários.
46 a 51	Valor primário da relação do transformador de corrente.

Tabela 4.6 - Formato dos dados de relés

O nome do relé deve ser aquele que está cadastrado nos dados de características de operação (seção 3.2.2). O dado de ajuste de tempo (curva) deve ser um valor entre $\frac{1}{2}$ e 10.

4.3.2 Armazenamento dos dados de relés

O programa lê os dados de ajuste dos relés e os armazena em uma estrutura esparsa como está mostrado na figura 4.4. Esta estrutura esparsa é composta de uma lista encadeada com as linhas que partem de uma determinada barra. Desta forma, um determinado relé é identificado pelo barramento onde ele está instalado e pela linha de transmissão protegida por ele.

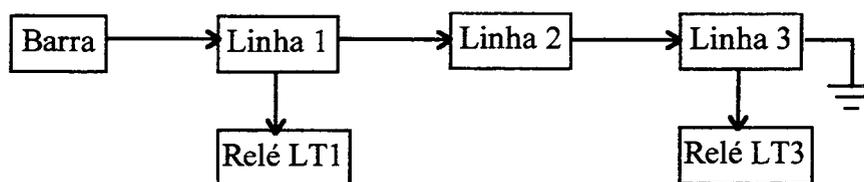


Figura 4.4- Estrutura esparsa dos dados de relés

Como pode ser observado, cada relé está conectado a uma determinada linha de transmissão. Portanto, a corrente que por ele circula, pode ser obtida diretamente do fluxo na respectiva linha. A partir desta estrutura também fica fácil se percorrer a rede em busca dos relés de proteção primária e retaguarda, como está descrito no item a seguir.

4.3.3 Pesquisa na estrutura esparsa

A pesquisa dos relés de proteção primária utiliza uma rotina recursiva (figura 4.5) que percorre a estrutura esparsa da figura 4.4. A partir da barra e respectiva linha que identificam o relé, a rotina determina a barra remota e pesquisa se existem relés nesta barra. Se, por exemplo, a rotina não encontra um relé, caso da Linha 2 da figura 4.4, a rotina utiliza a recursividade para procurar a partir desta nova linha e barra. A recursividade é limitada a um número finito de chamadas. Procedimento semelhante é utilizado para a determinação das proteções de retaguarda.

No relatório *Computer-Aided Relay Protection Coordination* [6], do EPRI, é apresentada uma estrutura semelhante, denominada de LINKNET, que é utilizada também para determinação dos pares de proteção primária/retaguarda e do conjunto de abertura de laços.

4.4 CÁLCULO DA COORDENAÇÃO

A rotina de coordenação verifica ponto a ponto a coordenação entre dois relés de sobrecorrente para toda a extensão da curva do relé de retaguarda, a partir do múltiplo do *tap* igual a 1,5 até o múltiplo para a corrente de falta.

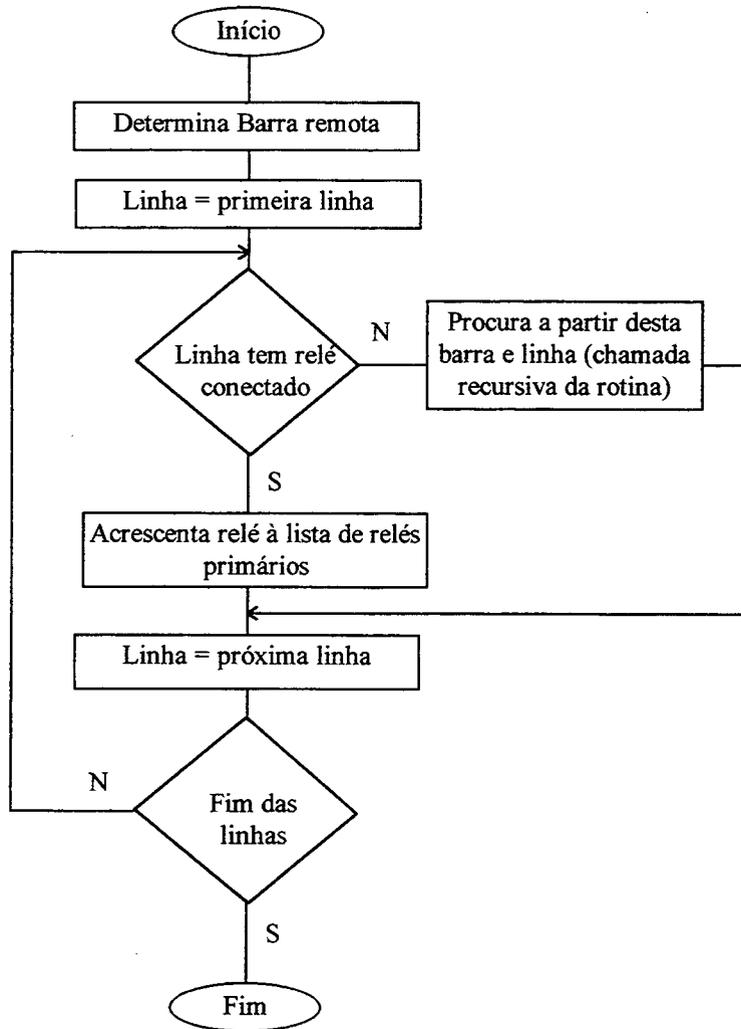


Figura 4.5 - Fluxograma da rotina de determinação dos relés primários

Em relés de sobrecorrente eletromecânicos, quando a corrente de operação do relé está um pouco acima do ajuste de *pickup*, o torque de operação é tão baixo que qualquer atrito ou pequenos erros na calibração do relé podem impedir a sua atuação. Por isso, a maioria dos fabricantes não fornece tempos de atuação para múltiplos menores do que 1,5, tendo em vista a não repetibilidade do relé. Os relés estáticos e digitais são mais precisos e os fabricantes fornecem as curvas com tempos a partir do múltiplo 1,1.

Na verificação da coordenação em um ponto da curva, o tempo de atuação do relé de proteção de retaguarda é o tempo lido do banco de dados na sua respectiva curva e o tempo de atuação do relé de proteção primária é calculado por uma interpolação logarítmica linear. Com este procedimento garante-se que o tempo do relé de proteção de retaguarda é o tempo publicado pelos fabricantes, enquanto o tempo do relé de proteção primária possui um valor conservativo, devido a interpolação linear.

A rotina de verificação da coordenação é utilizada no processo de determinação de um novo ajuste para o relé de retaguarda. A rotina de ajuste consiste de duas subrotinas, uma para a determinação do *tap* e outra para a determinação da curva do relé de retaguarda, como pode ser visto no fluxograma da figura 4.6.

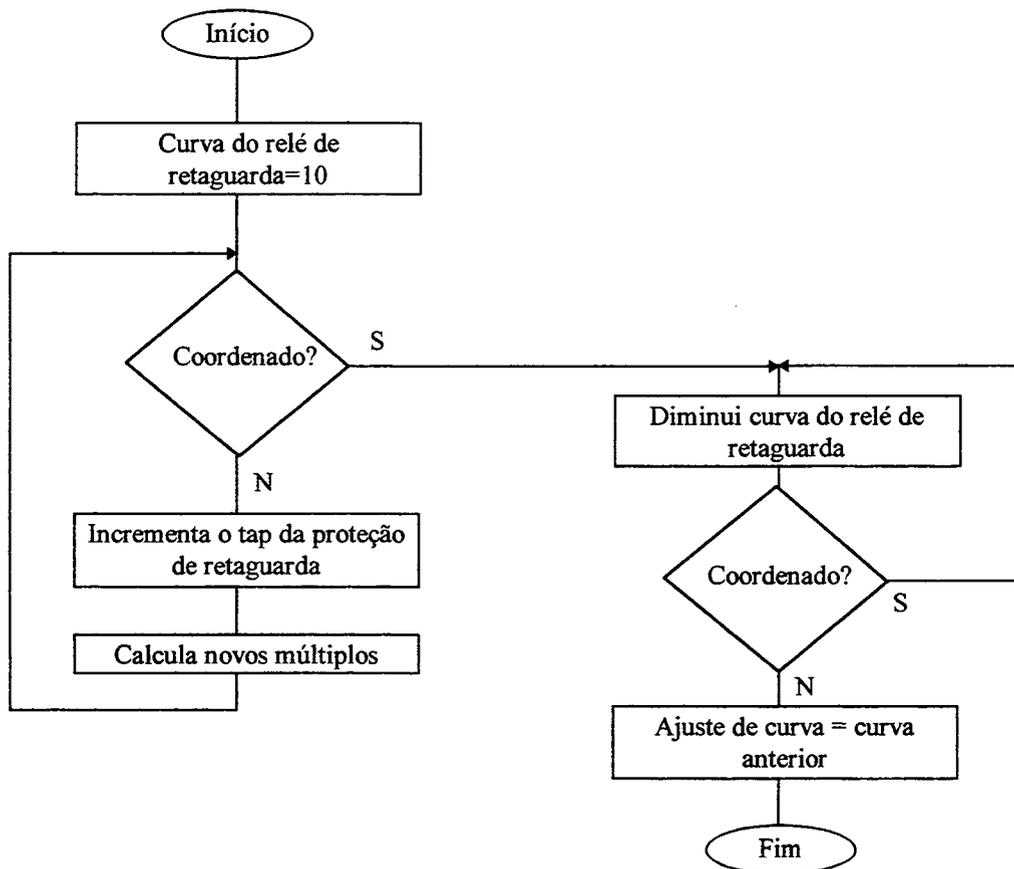


Figura 4.6 - Fluxograma da rotina de determinação do ajuste

Para o ajuste da unidade instantânea o programa verifica se a relação entre o valor da corrente de curto-circuito, na situação indicada pelo usuário, e o valor atual do ajuste da unidade instantânea é superior a 80%. Caso esta condição se verifique, o programa ajusta a unidade instantânea em um valor 25% acima do valor da corrente de curto-circuito, caso contrário o ajuste da unidade instantânea é mantido. Este fator de 25%, denominado de fator de sobrealcance transitório, aplicado à unidade instantânea, é utilizado para garantir que não ocorra atuação para curtos-circuitos fora da zona de proteção, principalmente por causa da assimetria da forma de onda que aparece durante o curto-circuito.

4.5 A INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

O programa foi desenvolvido no ambiente *Visual Basic*® que proporciona a criação de uma interface homem-máquina através de janelas e com comandos utilizando o *mouse*. A figura 4.7 mostra a tela de entrada do programa. Esta tela é mostrada quando se inicia a execução do programa. Inicialmente todos os controles estão desativados; para ativá-los é necessário entrar no menu de *Opções* e escolher a opção *Seletividade*. A partir daí o programa solicita que se entre com o nome do arquivo que contém os dados de curto-circuito (seção 4.2.1); o programa, então, abre uma janela indicando a leitura dos dados de linhas, barras e mútuas, indica ainda as montagens das matrizes de impedâncias primitivas e das matrizes de admitância de barras. Se alguma inconsistência for encontrada o programa abre uma outra janela mostrando as inconsistências encontradas e termina a execução do programa. Depois da leitura dos dados para cálculo do curto-circuito, o programa solicita o nome do arquivo que contém os dados de ajuste dos relés (seção 4.3.1). Se alguma inconsistência for encontrada nos dados de relés, o programa abre uma janela mostrando as

inconsistências encontradas e continua a execução do programa. A partir deste instante os controles da tela inicial estão disponibilizados.

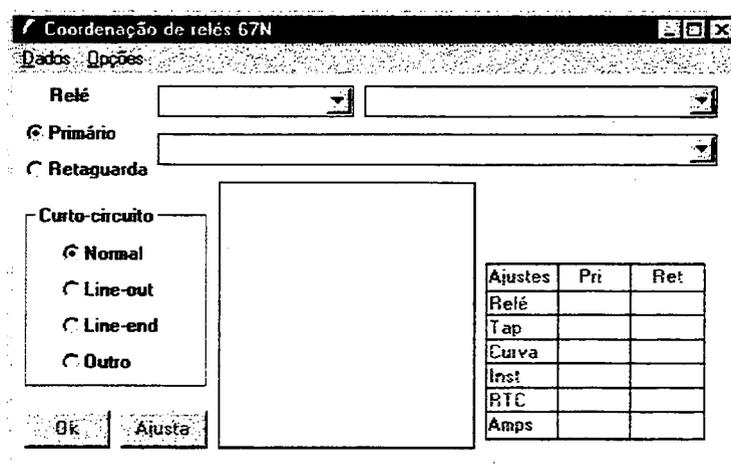


Figura 4.7 - Tela de entrada do programa

No rótulo *Relé* (figura 4.8) existem duas caixas de combinação, uma para a barra e outra para a linha. Estas caixas de combinação são utilizadas para a identificação de um relé (seção 4.3.2), uma vez que foi escolhida uma barra, a segunda caixa de combinação é preenchida com as linhas, que partem daquela barra e que possuem relés conectados.

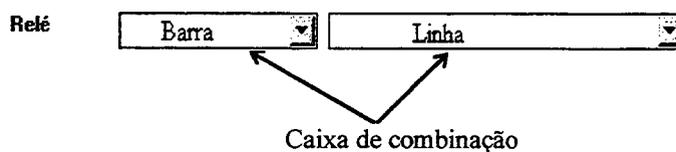


Figura 4.8 - Rótulo Relé

Abaixo do rótulo *Relé* se encontram duas opções: *Primária* e *Retaguarda* (figura 4.9). A escolha de uma destas opções indica o que vai aparecer na caixa de combinação à direita. Se a opção *Primária* for escolhida, a caixa de combinação à direita das opções será

preenchida com os relés de proteção que estão na frente do caminho de coordenação do relé escolhido no rótulo *Relé* (seção 4.3.3). Se a opção *Retaguarda* for selecionada, a caixa de combinação à direita das opções será preenchida com os relés de proteção que estão atrás do caminho de coordenação do relé escolhido. Neste caso, o relé selecionado no rótulo *Relé* é a proteção primária. A caixa de combinação é preenchida com um texto no formato “barra / linha” para identificar o relé (seção 4.3.2). No caso da escolha da opção *primária*, a primeira linha da caixa de combinação é preenchida com a palavra *todos*. Se esta linha for escolhida, o programa verifica a coordenação com todos os relés da caixa de combinação, que são todos os relés de proteção primária e mostra no coordenograma a coordenação do relé de retaguarda (escolhido no rótulo *Relé*), com uma curva equivalente obtida a partir dos relés de proteção primária. Esta curva equivalente consiste dos maiores tempos encontrados nos relés de proteção primária nos pontos onde é verificada a coordenação.

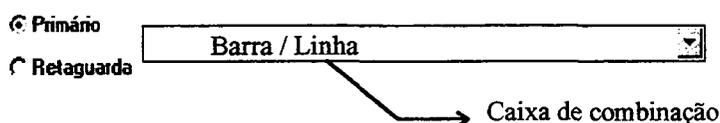


Figura 4.9 - Opções primária e retaguarda.

Um pouco abaixo das opções *Primária* e *Retaguarda* existe um grupo de opções chamado de *Curto-circuito* (figura 4.10). Neste grupo de opções pode-se selecionar qual a contingência que vai ser analisada para a verificação da coordenação (seção 4.2.3):

- *Normal* - nesta opção o programa calcula os valores de curto-circuito na barra do relé de proteção primária sem nenhuma contingência;

- *Line-out* - nesta opção o programa calcula os valores de curto-circuito na barra onde está localizada a proteção primária, porém abre a linha em que está instalado o relé de proteção primária;
- *Line-end* - nesta opção o programa calcula os valores de curto-circuito na barra onde está localizada a proteção primária, porém o defeito é aplicado no final da linha onde o relé de proteção primária está instalado;
- *Outro* - nesta opção o programa abre um novo formulário onde, para o par de proteção primária/retaguarda já definido, qualquer defeito no sistema elétrico pode ser definido. Um defeito em uma outra barra e aplicação de contingências do tipo *normal*, *line-out* ou *line-end* em qualquer circuito que esteja conectado a esta barra.

Quanto maior o número de contingências examinado, mais refinado fica o ajuste e maior é a facilidade na análise de perturbações.

Curto-circuito

- Normal
- Line-out
- Line-end
- Outro

Figura 4.10 - Grupo de contingências a simular

Assim que se tenha escolhido um relé e, por exemplo, um relé de proteção de retaguarda, com o acionamento do botão *Ok*, o programa plota e verifica a coordenação entre os relés para a contingência especificada e carrega o ajuste dos respectivos relés na tabela que está à direita (figura 4.11). Caso o múltiplo do relé de proteção de retaguarda seja inferior a

1,5, o programa apresenta uma mensagem informando que o relé de retaguarda não é sensível e não verifica a coordenação. O programa verifica a sensibilidade da unidade instantânea do relé de proteção de retaguarda e também apresenta uma mensagem informando que a unidade instantânea pode atuar fora da zona de proteção para o defeito simulado.

Após a verificação da coordenação o botão *Ajusta* é habilitado, possibilitando que uma rotina de ajuste automático faça o ajuste do relé de proteção de retaguarda (seção 4.4). Os ajustes dos relés podem ser editados a qualquer momento na tabela e qualquer valor pode ser modificado, desde o próprio tipo do relé até a relação do transformador de corrente. A última linha da tabela apresenta o valor da corrente em Ampères que passa pelo relé para a falta especificada.

No caso de a opção *Primária* ser escolhida e o relé selecionado seja a linha onde está a palavra *todos*, o botão de ajuste automático, neste caso, ajusta o relé de retaguarda levando em conta a curva equivalente de todos os relés de proteção primária, para a contingência especificada. Este tipo de configuração facilita em muito o trabalho de ajuste de um relé.

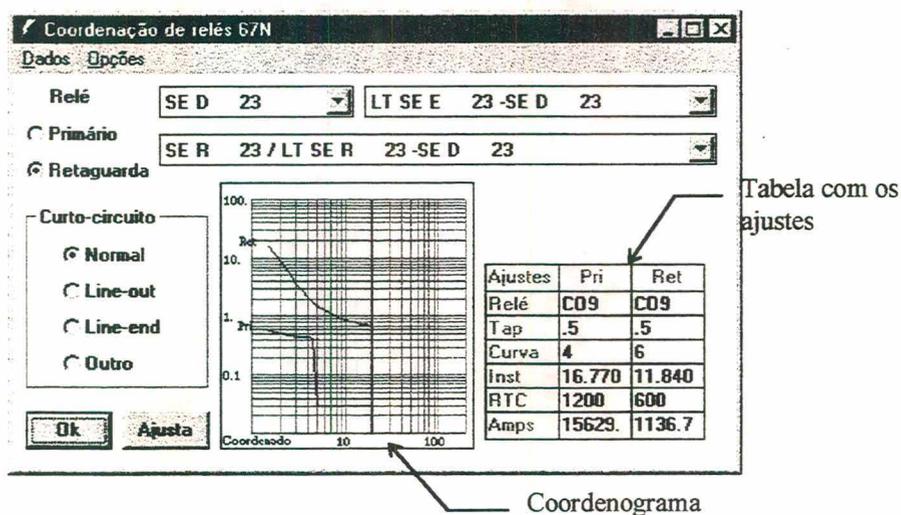


Figura 4.11 - Coordenação de relés 67N

Dentro do menu *Opções* existem ainda mais duas possibilidades de escolha, a opção *Curto-circuito* abre um formulário (figura 4.12) onde pode-se obter os valores de curto-circuito trifásico e monofásico, para qualquer barra e qualquer contribuição. Os valores apresentados no formulário estão em por unidade.

Curto-circuito	
Curto na barra:	SE D 23
Trifásico:	5.410
Monofásico:	6.554
Contribuição:	reference -SE D 23
Trifásico:	2.500
Monofásico(2I1+I0):	3.943
Monofásico (3I0):	5.774

Figura 4.12 - Formulário curto-circuito

A outra opção, dentro do menu *Opções*, é a de *Relatório*. Nesta opção, o programa cria um arquivo chamado RELAT.TXT com os valores de curto-circuito monofásico e trifásico para todas as barras do sistema e simulando também contingências.

No menu *Dados* existem três opções, a primeira para a entrada de dados de curto-circuito, a terceira para entrada de dados de relés e a segunda permite que sejam feitas modificações permanentes nos dados de curto-circuito pela abertura de linhas do sistema.

A qualquer instante, durante a execução do programa, pode-se abrir qualquer ramo que se queira. Esta opção é desejável para o caso de analisar o comportamento da proteção quando de manutenções em componentes do sistema de energia elétrica. Esta alteração permanece ativa até o término do programa.

4.6 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

Seja o diagrama unifilar de um sistema elétrico mostrado na figura 4.13, cujos dados de curto-circuito e dados de ajuste e localização dos relés se encontram no apêndice A.

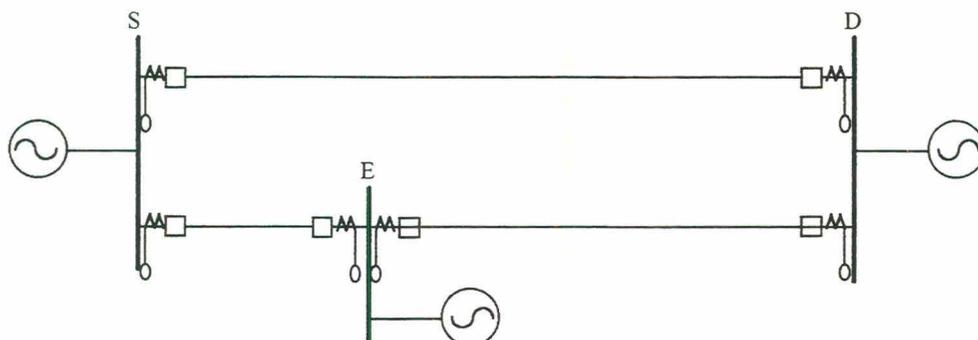


Figura 4.13 - Sistema exemplo

Para a verificação da coordenação entre o relé da subestação S no circuito para a subestação E, com o relé na subestação E no circuito para a subestação D, para um curto-circuito *line-out*, o programa fornece a resposta mostrada na figura 4.14.

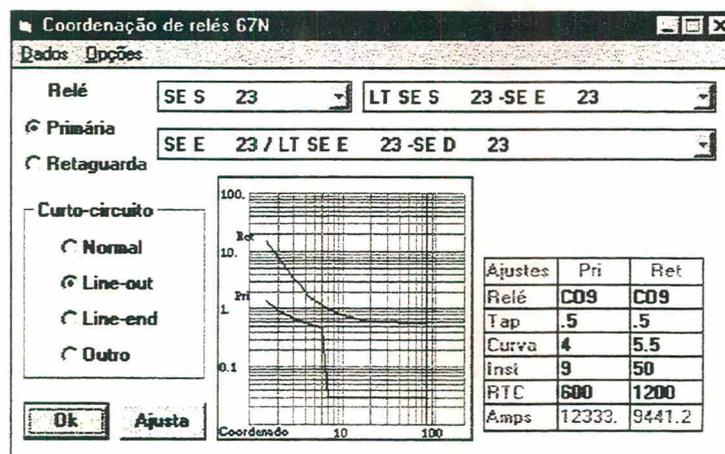


Figura 4.14 - Verificação da coordenação entre os relés das subestações S e E.

Se agora a fonte na subestação E estiver fora de operação, podemos verificar a coordenação utilizando no grupo de opções de *Curto-circuito* a opção *Outro*, o programa abre uma janela solicitando qual falta deve ser simulada. A falta a ser simulada é a retirada da fonte e está mostrada na figura 4.15. A coordenação para esta situação está mostrada na figura 4.16.

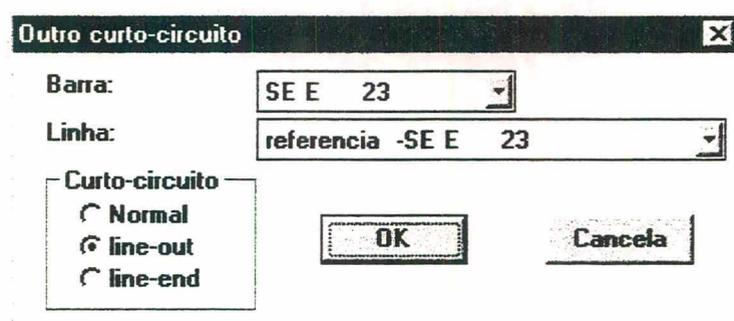


Figura 4.15 - Simulação de abertura da fonte na subestação E

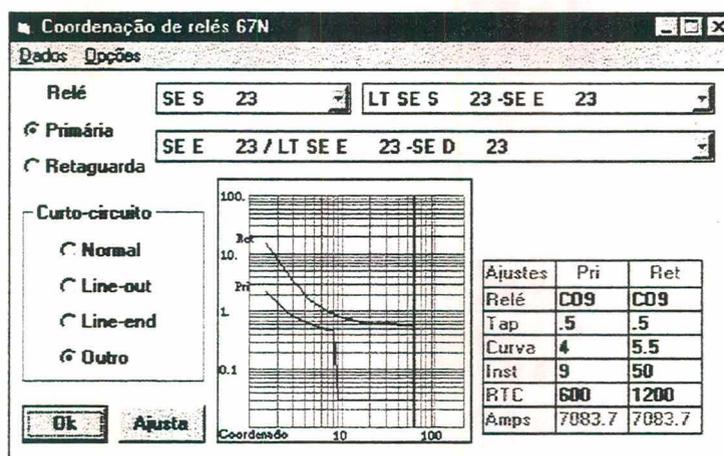


Figura 4.16 - Coordenação sem a fonte na subestação E

Devido ao crescimento da carga foi necessário construir uma nova subestação que foi conectada ao sistema seccionando a linha entre as subestações S e D. O diagrama unifilar do sistema elétrico resultante está mostrado na figura 4.17.

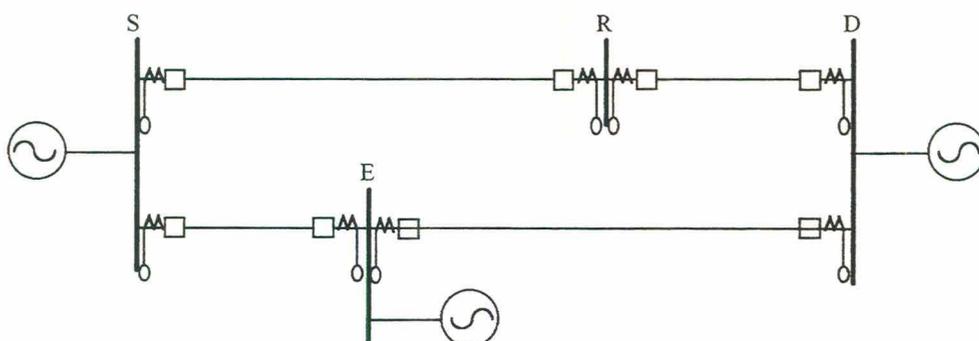


Figura 4.17 - Sistema exemplo com a entrada da subestação R

Para ajustar o relé da subestação R no circuito para a subestação D, coordenado com o relé da subestação D no circuito para a subestação E, seleciona-se esta situação e simula-se todos os tipos de falta e em seguida apertando o botão *Ajusta*, caso haja descoordenação. Ao final deste processo teremos o relé ajustado. Para dar início ao processo, o relé da subestação R deve ser incluído nos dados de relés com um ajuste qualquer e os novos dados de relés devem ser lidos pelo programa. A figura 4.18 mostra a mensagem de sensibilidade da unidade instantânea, devido o ajuste inicial escolhido ser baixo (1 Ampère).

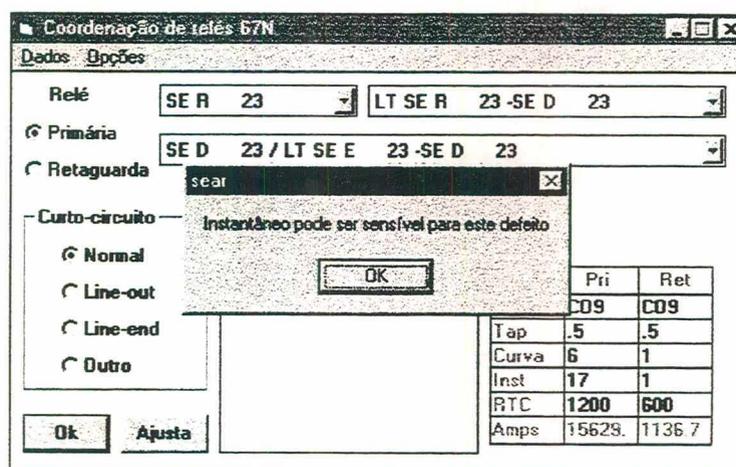


Figura 4.18 - Mensagem de sensibilidade da unidade instantânea

Apertando o botão *Ok* da mensagem é mostrada a coordenação (figura 4.19). Para ajustar o relé para esta condição basta agora pressionar o botão *Ajusta* e o resultado do ajuste está mostrado na figura 4.20.

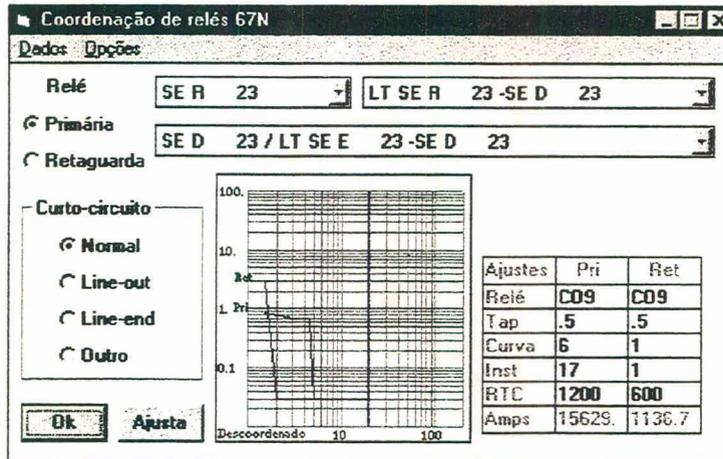


Figura 4.19 - Coordenação inicial dos relés das subestações R e D

Como pode ser observado na figura 4.20, foram modificados apenas os ajustes de curva e instantâneo do relé de retaguarda. Entretanto, uma opção que o programa permite ao usuário é alterar diretamente o tipo do relé e os ajustes de tap, curva, instantâneo e relação de TC, para os relés primário e retaguarda, simplesmente selecionando o ajuste que aparece na tabela.

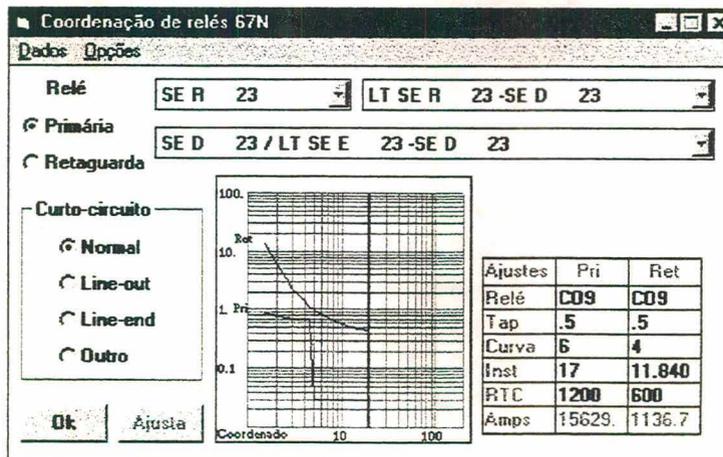


Figura 4.20 - Ajuste automático do relé da subestação R

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

A maior dificuldade encontrada na realização deste trabalho foi o desenvolvimento de um algoritmo para cálculo do curto-circuito que possibilitasse a integração com os dados de ajuste dos relés, já que toda a parte de coordenação de relés de sobrecorrente já havia sido desenvolvida em um trabalho anterior [17]. A utilização das matrizes de impedância primitivas fatoradas possibilitou uma grande facilidade e também acabou com os famosos grupos de linhas mutuamente acopladas que aparecem nos circuitos de seqüência zero e geram a necessidade de inversão de matrizes, tanto na montagem da matriz de admitância de barras quanto no cálculo das contribuições para um curto-circuito.

A utilização da técnica do vetor esparsa possibilitou obter-se as contribuições muito rapidamente aumentando a eficiência no cálculo do curto-circuito. Uma vantagem desta ferramenta é que ela pode ser utilizada como um programa de curto-circuito, dentro das suas limitações, com uma interface homem - máquina muito amigável. Outras vantagens auferidas têm relação com o ganho de tempo e com a simplificação de trabalho como pode ser notado pelas seguintes citações:

Estes programas computacionais resultam em uma ferramenta que pode ser usada para melhorar substancialmente a eficiência e exatidão do processo de coordenação. Um programa desta natureza tem o potencial de revolucionar os aspectos da engenharia de proteção por sobrecorrente devido ao ganho substancial de tempo se comparado com o processo convencional [4].

O trabalhoso e intensivo processo de obtenção de dados e a execução de um grande número de estudos de coordenação foi simplificado para o engenheiro de proteção pelo uso de uma metodologia de coordenação gráfica auxiliada por computador. A análise de coordenação gráfica, quando integrada com um banco de dados e um programa de curto-circuito interativo libera o engenheiro de proteção de muitas atividades de levantamento e tratamento de dados e aumenta sua produtividade, permitindo a ele se concentrar na arte e na ciência da proteção por relés [23].

Como o computador assume cada vez mais e mais as tarefas tediosas e repetitivas envolvidas com a proteção do sistema, tais como o cálculo de faltas e a determinação dos correspondentes tempos de operação dos relés, o engenheiro de proteção tem mais tempo para examinar o seu sistema de proteção global e avaliar mudanças potenciais como equipamentos alternativos de proteção, compromissos entre coordenação e tempo de eliminação, e várias condições de operação [15].

A partir dos dados para cálculo do curto-circuito do sistema de energia elétrica da COPEL e os dados de ajuste de todos os relés de sobrecorrente direcionais de neutro das linhas da COPEL é possível, a qualquer momento, verificar a coordenação de um par de proteção primária / retaguarda, para qualquer configuração do sistema elétrico e qualquer localização da falta, isto em questão de segundos. Se for encontrada alguma descoordenação, uma ação corretiva pode ser tomada imediatamente pelo acionamento da rotina de ajuste automático.

Cumprе ressaltar que esta aplicação elimina muitas possibilidades de erros que podem ocorrer por exemplo durante a leitura da listagem de curto-circuito, durante o levantamento dos ajustes dos relés, durante o processo para desenho do coordenograma, etc.

A partir do desenvolvimento de uma aplicação como esta verifica-se a necessidade de que esta ferramenta possibilite, também, a integração de outras proteções, tais como relés de distância, relés de sobrecorrente de transformadores, religadores, fusíveis, etc.

APÊNDICE - A

DADOS DO SISTEMA EXEMPLO

Dados para cálculo do curto-circuito:

```

38
 1   SE S   23
 2   SE E   23
 3   SE R   23
 4   SE D   23
9999
37
 0   1      2400      900
 0   2      2800      X
 1   2      1000     3500
 1   3      2800     6000
 2   4      4000    12000
 3   4      1800     5200
 0   4      4000     1000
9999
39
9999
30

```

Dados de ajuste dos relés:

```

0001  0002  67N CO9  0.50  5.50  50.0 1200
0001  0003  67N CO9  0.50  4.50  12.0  600
0002  0001  67N CO9  0.50  4.00  11.0  600
0002  0004  67N CO9  0.50  4.00  9.00  600
0004  0002  67N CO9  0.50  6.00  17.0 1200
0004  0003  67N CO9  0.50  5.50  8.00 1200
0003  0001  67N CO9  0.50  1.00  1.00  600
0003  0004  67N CO9  0.50  1.00  1.00  600

```

APÊNDICE - B

ABERTURA DE UMA LINHA MUTUAMENTE ACOPLADA

O procedimento consiste em incluir uma linha de transmissão na faixa de passagem com o negativo da impedância da linha de transmissão original, mas com acoplamentos mútuos iguais aos da linha de transmissão original. Neste caso, a matriz de impedância primitiva modificada é dada por:

$$z_{prim}^{mod} = \begin{bmatrix} z_{prim} & z_L \\ z_L^T & z_m \end{bmatrix} \quad (B.1)$$

O vetor z_L ($n_L \times 1$), onde n_L é o número de linhas de transmissão, é obtido a partir da matriz de impedância primitiva original e é igual à linha da matriz de impedância primitiva da linha de transmissão que está sendo aberta, com o valor de sua impedância própria igual a zero. O valor de z_m é igual ao negativo da impedância própria da linha de transmissão. Isto pode ser melhor entendido observando-se a estrutura da matriz de impedâncias primitivas modificada que está mostrada na figura B.1.

...
...	Z_1	...	Z_{12}	...	Z_{1m}	...	Z_{1m}
...
...	Z_{12}	...	Z_2	...	Z_{2m}	...	Z_{2m}
...
...	Z_{1m}	...	Z_{2m}	...	Z_m	...	0
...
...	Z_{1m}	...	Z_{2m}	...	0	...	$-Z_m$

Mesmos acoplamentos da linha a ser aberta

Valor nulo

Negativo da impedância própria

Figura B.1 - Estrutura de z_{prim} modificada

A nova matriz de admitância primitiva, obtida pela inversão da matriz de impedâncias primitiva modificada, é dada pela expressão B.2.

$$y_{prim}^{nova} = \begin{bmatrix} \left(z_{prim} - \frac{z_L \cdot z_L^T}{z_m} \right)^{-1} & -z_{prim}^{-1} \cdot z_L \cdot \left(z_m - z_L^T \cdot z_{prim}^{-1} \cdot z_L \right)^{-1} \\ -z_L \cdot z_{prim}^{-1} \cdot \left(z_m - z_L^T \cdot z_{prim}^{-1} \cdot z_L \right)^{-1} & \left(z_m - z_L^T \cdot z_{prim}^{-1} \cdot z_L \right)^{-1} \end{bmatrix} \quad (B.2)$$

O algoritmo de formação da matriz de impedância de barra (Z_{bus}) segue um processo de inclusão de linha por linha [3]. A formação da matriz Z_{bus} , por este método, tem tratamentos distintos para os três tipos de linhas a serem incluídas na rede, que são:

- linha que conecta a barra de referência a uma nova barra;
- linha que conecta uma barra já incluída a uma nova barra (linha radial);
- linha que conecta duas barras já incluídas (linha de fechamento de laço).

Imediatamente após a inclusão de uma linha de fechamento de laço, a linha e a coluna da matriz aumentada obtida são eliminadas pela redução de Kron. O tratamento para a

inclusão de uma linha de transmissão de fechamento de laço mutuamente acoplada tem a formulação descrita a seguir.

A partir da nova matriz de admitância primitiva dada pela expressão B.3, cujos elementos são calculados a partir da expressão B.2.

$$y_{prim}^{nova} = \begin{bmatrix} y_{prim}^{mod} & y_L \\ y_L^T & y_m \end{bmatrix} \quad (B.3)$$

Forma-se a nova coluna ($Z_{laço}$ – vetor de fechamento de laço) a partir da matriz de impedância de barras (Z_{bus}) dada pela expressão B.4

$$Z_{laço} = Z_{bus} \cdot \left(e_{k,l} + A \cdot \frac{y_L}{y_m} \right) \quad (B.4)$$

Onde Z_{bus} ($n \times n$), sendo n o número de barras, é a matriz de impedância de barras, $e_{k,l}$ ($n \times 1$) é um vetor que recebe 1 e -1, respectivamente nas linhas referentes aos nós k e l da linha de transmissão, A ($n \times n_L$) é a matriz de incidência, y_L ($n_L \times 1$) é o vetor da nova matriz de admitância primitiva da linha de fechamento de laço e y_m é a admitância própria.

A partir do vetor de fechamento de laço calcula-se o valor do novo elemento diagonal ($Z_{laço,laço}$), que é dado pela expressão B.5.

$$Z_{laço,laço} = \frac{1}{y_m} + Z_{laço}^T \cdot \left(e_{k,l} + A \cdot \frac{y_L}{y_m} \right) \quad (B.5)$$

Pode ser observado nesta formulação que a primeira parcela em $Z_{laço} (e_{k,l})$ é referente a inclusão de uma linha de transmissão sem acoplamento mútuo. Portanto, a segunda parcela $(A \cdot \frac{y_L}{y_m})$ é devida aos acoplamentos mútuos.

O eixo de laço é então eliminado da matriz Z_{bus} por meio de uma redução de Kron que está mostrada na expressão B.6.

$$Z_{bus}^{mod} = Z_{bus} - \frac{Z_{laço} \cdot Z_{laço}^T}{Z_{laço,laço}} \quad (B.6)$$

Substituindo as expressões B.4 em B.5 e na expressão B.6 chega-se à expressão final para a abertura de uma linha de transmissão com acoplamento mútuo que é utilizada neste trabalho.

$$Z_{bus}^{mod} = Z_{bus} - Z_{bus} \cdot \left(e_{k,l} + A \cdot \frac{y_L}{y_m} \right) \cdot \left[\frac{1}{y_m} + \left(e_{k,l} + A \cdot \frac{y_L}{y_m} \right)^T \cdot Z_{bus} \cdot \left(e_{k,l} + A \cdot \frac{y_L}{y_m} \right) \right]^{-1} \cdot \left(e_{k,l} + A \cdot \frac{y_L}{y_m} \right)^T \cdot Z_{bus} \quad (B.7)$$

A expressão B.7 é então utilizada para a determinação da coluna de interesse da matriz de impedância de barras modificada que leva em conta a abertura da linha mutuamente acoplada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAPESWARA RAO, V. V.; SANKARA RAO, K. Computer aided coordination of directional relays: determination of break points. IEEE Transactions on Power Delivery. v. 3, n. 2, p. 545-548, April, 1988.
2. BONK, J. J.; KRUSE, V. J.; LEBLANC, P. R.; RANKIN, G. L. Wescargo - a systems analysis approach to protective device coordination. ABB Review, n. 7, p.15-20, 1991.
3. BROWN, H. E. Grandes sistemas elétricos - métodos matriciais. Itajubá, LTC/EFEI, 1977.
4. BROWN, K. A.; PARKER, J. M. A personal computer approach to overcurrent protective device coordination. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 2, p. 509-513, April, 1988.
5. CHAN, S.; MAURER, R. Modeling overcurrent relay characteristics. IEEE Computer Applications in Power, p. 41-45, January, 1992.
6. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Computer-aided relay protection coordination. Final Report, December, 1988.
7. ELRAFIE, H. B.; IRVING, M. R. Linear programming for directional overcurrent relay coordination in interconnected power systems with constraint relaxation. Electric Power System Research, v. 27, p. 209-216, 1993.
8. ENGLISH, W.; ROGERS, C. Automating relay coordination. IEEE Computer Applications in Power, p. 22-25, July, 1994.
9. HONG, H. W.; SUN, C. T.; MESA, V. M.; NG, S. Protective device coordination expert system. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, n. 1, p.359-365, January, 1991.

- 10.HOROWITZ, S.H.; PHADKE, A.G. Power System Relaying, England, Research Studies Press, 1992.
- 11.IEEE COMMITTEE REPORT. Computer aided coordination of line protection schemes. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, n. 2, p. 575-583, April 1991.
- 12.IEEE COMMITTEE REPORT. Computer representation of overcurrent relay characteristics. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n. 3, p. 1659-1667, July, 1989.
- 13.JENKIS, L.; KHINCHA, H.P.; SHIVAKUMAR, S.; DASH, P.K. An application of functional dependencies to the topological analysis of protection schemes. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 1, p. 77-83, January, 1992.
- 14.JOHN, M. S.; BORGNINO, A. Coordinating overcurrent protection devices. IEEE Computer Applications in Power, p. 41-44, July, 1996.
- 15.JUVES, J. A.; JOHNSON, R. W.; MAYER, E. J.; WATERS, S. S. The concept of figure of merit applied to protection system coordination. IEEE Transactions on Power Delivery, v. PWRD-1, n. 4, p.31-40, October, 1986.
- 16.KAWAHARA, K.; SASAKI, H.; SUGIHARA, H. An application of ruled based system to the coordination of directional overcurrent relays. IEE 6th International Conference on Developments in Power Protection, p. 58-59, 1997.
- 17.KLOCK, O. S. Programa em microcomputador para a verificação da coordenação entre relés de sobrecorrente de transformadores e religadores. III Seminário Técnico de Proteção e Controle, p. 111-115, 1991.
- 18.LAWAY, N. A.; GUPTA, H. O. An efficient method for generation, storage and retrieval of data for the coordination of directional relays. Electric Power System Research, v. 29, p.147-152, 1994.

- 19.MADHAVA RAO, T. S. Power system protection - static relays. New Delhi, McGraw-Hill, 1981.
- 20.MADKOUR, M. A.; EL-SAYED, M. A. H. A knowledge based approach for setting protective relays in transmission networks. Electric Power System Research, v. 27, p.107-115, 1993.
- 21.MASON, C.R. The art and science of protective relaying. John Wiley & Sons, New York, 1967.
- 22.PRASAD, V. C.; PRAKASA RAO, K. S.; SUBBA RAO, A. Coordination of directional relays without generating all circuits. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, n. 2, p.584-590, April, 1991.
- 23.RAMASWANI, R.; McGUIRE, P. F. Integrated coordination and short circuit analysis for system protection. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 3, p.1112-1120, July, 1992.
- 24.ROGERS, C.;RAMASWANI, R.;McGUIRE, P. Graphical coordination program aids system relaying at Consumers Power. IEEE Computer Applications in Power, v. 3, n. 3, p.30-34, July 1990.
- 25.SACHDEV, M. S.; SINGH, J.; FLEMING, R. J. Mathematical models representing time-current characteristics of overcurrent relays for computer applications. IEEE PES Winter Meeting, NewYork, p.1-8, 1978.
- 26.SO, C. W.; LI, K. K.; LAI, K. T.; FUNG, K. Y. Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination. IEE 6th International Conference on Developments in Power Protection, p. 66-69, 1997.
- 27.STAGG, G. W.; EL-ABIAB, A. H. Computer methods in power system analysis. Tokio, McGraw-Hill, 1968.

- 28.URDANETA, A. J.; NADIRA, R.; PEREZ, L. G. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 3, p. 903-911, 1988.
- 29.URDANETA, A. J.; PEREZ, L. G.; RESTREPO, H. Optimal coordination of directional overcurrent relays considering dynamic changes in the network topology. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 4, p. 1458-1464, 1991.
- 30.URDANETA, A. J.; RESTREPO, H.; MARQUEZ, S.; SANCHES, J. Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n.1, p.122-128, January, 1996.
- 31.WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. Applied protective relaying. Newmark, 1976.