



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THALES MORAIS BRAGA LYRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DA FUNÇÃO DE RELÉS DE
SOBRECORRENTE DIRECIONAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

OUTUBRO DE 2013

THALES MORAIS BRAGA LYRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

*TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO À UNIDADE
ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM CIÊNCIAS NO DOMÍNIO DA
ENGENHARIA ELÉTRICA.*

ORIENTADORA:

PROFESSOR NÚBIA SILVA DANTAS BRITO

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

OUTUBRO DE 2013

THALES MORAIS BRAGA LYRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

*TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO À UNIDADE ACADÊMICA
DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE BACHAREL EM CIÊNCIAS NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA
ELÉTRICA.*

APROVADO EM / /

THALES MORAIS BRAGA LYRA
ALUNO

PROFESSOR AVALIADOR

NÚBIA SILVA DANTAS BRITO
ORIENTADORA

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- A minha mãe, Magali, e ao meu pai, Marcos, por todo o empenho nesta longa empreitada.
- A minha professora orientadora, Núbia, por ter aberto essa oportunidade de aprendizado e crescimento quando muitos não acreditavam no meu trabalho.
- A Jamile que me ajudou nos momentos mais difíceis.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de forma positiva nessa jornada.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 . Transformador de corrente (GUERRA, 2013).....	4
Figura 2.2 Polaridade de um TC (Kindermann, 1999).	5
Figura 2.3 Transformador de potencial (GUERRA, 2013).....	5
Figura 2.4 Representação de um sistema em anel protegido por relés direcionais de sobrecorrente (http://www.selinc.com.br/produtos/SEL-451-5.aspx acessado em: 23/07/2013 14:33).....	7
Figura 2.5 Curva de tempo definido.....	8
Figura 2.6 Curvas de tempo dependente.	9
Figura 2.7 Relé direcional (GUERRA, 2013).....	10
Figura 2.8 Diagrama fasorial e regiões de operação do relé (GUERRA, 2013).....	10
Figura 2.9 Relé direcional estático (GUERRA, 2013).	11
Figura 2.10 Relé digital da SEL (http://www.selinc.com.br/produtos/SEL-451-5.aspx acessado em: 23/07/2013 14:33).....	12
Figura 2.11 Diagrama de blocos de um relé digital típico (GUERRA, 2013).....	12
Figura 2.12 Esquema de proteção de retaguarda.....	13
Figura 3.1 Área de trabalho do CAPE.	14
Figura 4.1 Sistema-teste (Disponível em: http://www.pes-prsrc.org/Reports/archive/Apublications_old_format.html , Acesso em: 17 julho. 2013, 16:30:30.).....	17
Figura 4.2 <i>Menu</i> de seleção da base de dados e <i>template</i>	18
Figura 4.3 Itens do módulo One Line Diagram.....	18
Figura 4.4 Menu de configuração das barras.....	19
Figura 4.5 <i>Menu</i> de configuração de linhas.	19
Figura 4.6 Menu de configuração dos geradores e motores.	20
Figura 4.7 Menu de configuração dos transformadores.....	21
Figura 4.8 Menu de inserção das zonas de proteção.....	22
Figura 4.9 Menu de inserção dos TC.	22
Figura 4.10 Diagrama unifilar obtido no CAPE.....	23
Figura 4.11 Janela para seleção do algoritmo do relé.	24
Figura 4.12 Falta entre as barras 1 e 2.....	25
Figura 4.13 Falta entre as barras 1 e 2.....	25
Figura 4.14 Falta entre as barras 1 e 2.....	26
Figura 4.15 Falta entre as barras 1 e 2.....	26
Figura 4.16 Falta entre as barras 5 e 6.....	26
Figura 4.17 Falta entre as barras 2 e 3.....	27
Figura 4.18 Curvas dos relés de sobrecorrente.....	27
Figura 4.19 Relé direcional de sobrecorrente.....	28
Figura 4.20 Relé direcional de sobrecorrente.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela A1 - Configuração das torres das linhas em anel de 230 kV.....	34
Tabela A2 Corrente de curto-circuito máximo.....	34
Tabela B1 - Configuração das torres das linhas radiais de 230 kV.....	36
Tabela B2 - Correntes de curto circuito trifásico em cada barra.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP - *Alternative Transient Program*

CAPE - *Computer Aided Protection Engineering*

RTC - Relação do transformador de corrente

TC - Transformador de corrente

TP - Transformador de potencial

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ - Fase

f_p -Força magnetomotriz do primário

f_s - Força magnetomotriz do secundário

N_p - Número de espiras do primário

N_s - Número de espiras do secundário

\mathcal{R} - Relutância

I_p - Corrente do primário

I_s - Corrente do secundário

Δt - Tempo de coordenação

$t_{\text{relé jusante}}$ - tempo de atuação do relé a jusante

$t_{\text{relé montante}}$ - tempo de atuação do relé a montante

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1.	FILOSOFIA DA PROTEÇÃO	2
2.2.	TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	2
2.3.	TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTOS	3
2.3.1.	TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TC).....	3
2.3.2.	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (TP)	5
2.4.	DISJUNTORES.....	6
2.5.	RELÉS	6
2.5.1	RELÉS ELETROMECCÂNICOS.....	9
2.5.2	RELÉS ESTÁTICOS OU ELETRÔNICOS	11
2.5.3	RELÉS DIGITAIS	11
2.6.	PROCESSO DE COORDENAÇÃO DE RELÉS	13
3.	O SOFTWARE CAPE	14
3.1.	MÓDULOS DO CAPE.....	15
4.	ESTUDO DE CASO	17
4.1.	INICIANDO A SIMULAÇÃO	17
4.2.	BARRAS.....	18
4.3.	LINHAS DE TRANSMISSÃO	19
4.4.	MOTORES E GERADORES.....	20
4.8.	DIAGRAMA UNIFILAR	23
4.9.	PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS	23
4.10.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	25
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
6.	BIBLIOGRAFIA	30
	ANEXO A	31
	FONTES IDEAIS	31
	FONTE S1 (230 kV).....	31
	FONTE S3 (230 kV).....	31
	MÁQUINA SÍNCRONA (S2)	31
	TRANSFORMADOR (CONECTADO A FONTE S2)	32
	LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 230kV	33

ANEXO B 36

1. INTRODUÇÃO

Atividades comuns como navegar na internet, assistir televisão ou estudar iluminado por uma lâmpada só são possíveis devido a energia elétrica. Escolas, indústrias, *shoppings* e uma infinidade de lugares precisam dela para funcionar. Na prática, o homem moderno é totalmente dependente da energia elétrica e dada a sua importância, os engenheiros eletricitas se deparam com o desafio de manter a continuidade do serviço, atendendo uma carga cada dia mais exigente. No entanto, nem sempre a continuidade de fornecimento pode ser mantida e nessa hora, o papel do engenheiro de proteção de sistemas elétricos ganha destaque. Dentre as suas muitas atribuições, uma das mais importantes é sem dúvida, assegurar que os impactos causados por falhas sejam mínimos, garantindo a segurança das pessoas e dos equipamentos utilizados.

Este Trabalho de Conclusão de Curso insere-se nesse contexto, em particular, apresenta o estudo, implementação e avaliação da função de relés de sobrecorrente direcional em linhas de transmissão utilizando o *software* CAPE (*Computer Aided Protection Engineering*).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se neste capítulo um resumo dos fundamentos teóricos utilizados no desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

2.1. FILOSOFIA DA PROTEÇÃO

Segundo a filosofia da proteção, toda anormalidade no sistema elétrico deve ser removida e isolada de modo que o mínimo de pessoas e equipamentos sejam afetados. A filosofia básica da proteção compreende conceitos indispensáveis para a correta operação do sistema elétrico, dentre os quais destacam-se (GUERRA, 2013):

- **Confiabilidade:** O sistema de proteção sempre deve atuar em caso de defeito, e apenas neste caso;
- **Sensibilidade:** A faixa de incerteza entre as condições de operação e de não operação deve ser a menor possível;
- **Velocidade:** O sistema de proteção deve atuar da forma mais rápida possível, de modo a evitar danos aos componentes da rede elétrica (efeitos térmicos e eletrodinâmicos) ou perda de estabilidade do sistema;
- **Seletividade:** O defeito deve ser eliminado desligando-se a menor parte possível da rede, de modo a ser mantido o máximo índice de continuidade de serviço.
- **Economia:** O custo do sistema de proteção deve ser compatível com o do equipamento protegido e com a importância deste último em relação ao funcionamento do resto do sistema.

2.2. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Devido às razões técnicas e econômicas, transmitir e distribuir energia elétrica ao longo de grandes distâncias em apenas um nível de tensão não é desejável, de

modo que, na prática, são realizadas inúmeras transformações ao longo do sistema. Os equipamentos utilizados para esse fim são denominados de transformadores de potência, os quais estão entre os equipamentos mais caros e importantes do sistema elétrico.

Um transformador de potência típico é constituído basicamente de duas bobinas (condutores) enroladas sobre um núcleo de carcaça ferromagnética (uma denominada de primário e outra de secundário), podendo ser conectado independentemente dos lados. Se a fonte é conectada do lado de baixa tensão e a carga do lado de alta tensão, o transformador é dito elevador de tensão, caso contrário é dito abaixador de tensão. Os transformadores são classificados conforme os níveis de potência, número de fases e tensão de operação. Pode-se construir unidades monofásicas ou trifásicas, sendo as monofásicas as mais usuais, visto que em caso de manutenção e armazenamento de equipamentos de reposição é necessário apenas 33% da reserva da capacidade instalada. Os transformadores trifásicos possuem como vantagem menores dimensões e preço mais baixo em relação ao conjunto de três transformadores monofásicos.

2.3. TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTOS

Na prática, os níveis de tensão e corrente em um sistema elétrico de potência são muito elevados. Entretanto, muitas vezes se faz necessário o uso de tensão e correntes de baixo valor, como por exemplo, a alimentação de equipamentos de medição, controle e proteção. Nestes casos, o sistema faz uso dos denominados transformadores para instrumentos, sendo os mais usuais: os transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP).

2.3.1. TRANSFORMADORES DE CORRENTE (TC)

Transformador destinado a reproduzir proporcionalmente em seu circuito secundário a corrente de seu circuito primário com sua posição fasorial mantida, conhecida e adequada para uso em instrumentos de medição controle e proteção (Kindermann, 1999). Os TC são ligados em série com a carga e segundo o

padrão adotado no Brasil, os equipamentos ligados ao seu secundário são alimentados com uma corrente de 5A (ABNT - NBR 6821. Transformadores de Corrente - Especificação, 1992). Para alimentar os instrumentos, os TC apresentam número de espiras do primário menor que o número de espiras do secundário e sua relação de transformação é dada conforme desenvolvimento a seguir.

$$\mathcal{F}_p - \mathcal{F}_s = \mathcal{R} \cdot \Phi \quad (2.1)$$

$$N_p I_p - N_s I_s = \mathcal{R} \cdot \Phi \quad (2.2)$$

Em um transformador ideal a relutância magnética igual à zero, assim:

$$N_p I_p - N_s I_s = 0 \quad (2.3)$$

$$RTC = \frac{N_s}{N_p} \quad (2.4)$$

$$I_s = \frac{I_p}{RTC} \quad (2.5)$$

Para o cálculo da corrente do primário, adota-se o critério do curto-circuito, que segundo o padrão P-EB-251 da ABNT é possível determinar a respectiva relação de transformação do TC, considerando o valor de FS constante igual a 20.

$$FS = \frac{I_{ccm\acute{a}x}}{I_{pnominal}} \quad (2.6)$$

Apresenta-se na Figura 2.1 o esquema de um TC típico com dois enrolamentos em um núcleo toroidal e seu modo de conexão.

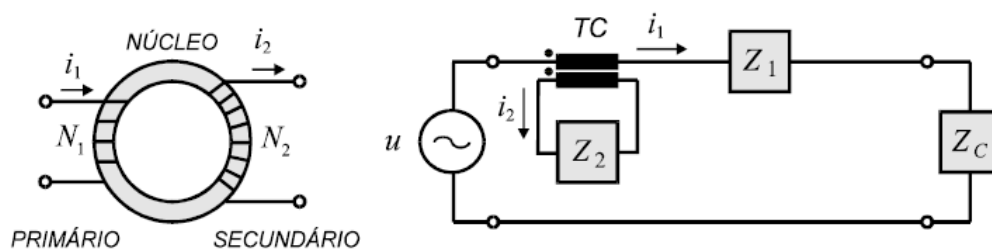


Figura 2.1 . Transformador de corrente (GUERRA, 2013).

A polaridade do TC é expressa simbolicamente por pontos e representa a forma como suas bobinas são enroladas no núcleo magnético. A corrente primária I_1 entra pela polaridade e a corrente secundária I_2 sai pela polaridade, indicando que as correntes estão em fase, conforme ilustrado na Figura 2.2.



Figura 2.2 Polaridade de um TC (Kindermann, 1999).

2.3.2. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (TP)

Transformador destinado a transmitir o sinal de tensão aos instrumentos de medição, controle e proteção. São subdivididos em TPC (transformador de potencial capacitivo), para tensões acima de 138 kV e TPI (transformador potencial indutivo), para tensões abaixo de 138 kV. Apresentam número de espiras no primário maior que o secundário, sendo o secundário ligado em paralelo com o circuito. Segundo a Norma NBR 6855 (NBR 6855 Transformadores de potencial - Especificação, 1992), os valores de tensão no secundário dos TP são da ordem de 115V ou $115/\sqrt{3}$ V. Apresenta-se na Figura 2.3, o esquema de um TP e seu modo de conexão.

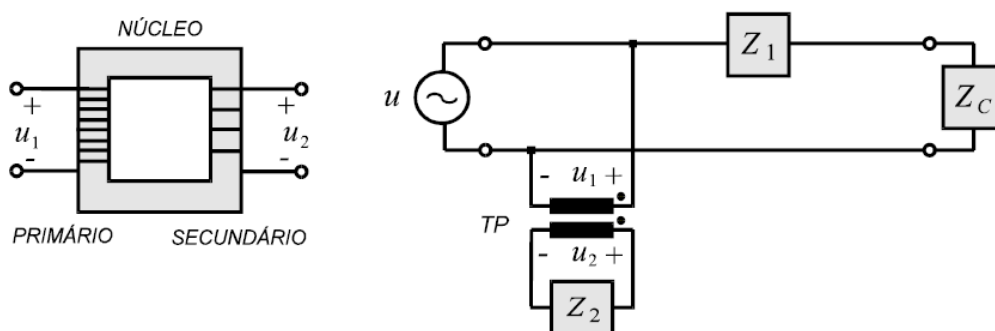


Figura 2.3 Transformador de potencial (GUERRA, 2013).

2.4. DISJUNTORES

Dispositivo responsável pela interrupção da corrente elétrica. Além das correntes de falta, o disjuntor pode interromper correntes nominais de carga, correntes de magnetização de transformadores e reatores e as correntes capacitivas de banco de capacitores e linhas em vazio, mediante o comando de um relé. Apresenta duas posições de funcionamento: fechado ou aberto. Quando fechado, comporta-se como um condutor oferecendo passagem da corrente elétrica à carga. Na situação em aberto, isola o circuito da carga, cessando a corrente circulante.

2.5. RELÉS

Dentre os equipamentos utilizados pelo sistema de proteção, o mais importante sem dúvida são os relés, que são os elementos responsáveis por identificar, localizar e alertar os defeitos aos operadores, além de poder promover o comando de abertura dos disjuntores com objetivo de isolar o defeito.

Existem vários tipos de relés, com aspectos construtivos distintos, estes são subdivididos em:

- Relés eletromecânicos;
- Relés estáticos ou eletrônicos;
- Relés digitais.

Os relés também podem ser diferenciados segundo sua forma de atuação, conforme breve descrição a seguir dos principais tipos utilizados.

- **Sobrecorrente (50/51):** relé mais simples e de custo mais baixo. É vastamente utilizado em sistemas radiais. Atua para uma corrente maior que seu ajuste de forma instantânea ou temporizada, dependendo da magnitude da corrente;
- **Direcional de potência (32):** opera com torque máximo quando o fluxo de potência ativa sofre inversão de sentido, como no caso dos fenômenos de motorização em geradores síncronos;

- **Sobretensão (59):** possui operação semelhante ao relé de sobrecorrente, mas com a grandeza de referência sendo a tensão;
- **Diferencial (87):** opera quando a diferença entre as correntes que entram e saem do equipamento protegido estão dentro de uma determinada faixa de valores;
- **Distância (21):** baseia-se na medição do valor da impedância de sequência positiva entre o ponto de localização do relé e a falta. O valor medido é proporcional à distância entre os pontos.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso deu-se ênfase ao estudo dos **relés direcionais de sobrecorrente (67)**, os quais baseiam-se na comparação entre duas grandezas, uma de referência, normalmente a tensão, e outra de operação, normalmente a corrente. As grandezas são comparadas fasorialmente e se a diferença entre elas estiver em uma determinada faixa o relé envia o comando para operação do disjuntor.

Existem relés exclusivamente direcionais, outros necessitam que unidades direcionais sejam acopladas. No caso de linhas em anel (Figura 2.4), a característica direcional é necessária, uma vez que pode haver a inversão da corrente de falta. O relé direcional confere característica radial ao sistema em anel, assim este se comporta como dois sistemas radiais em sentidos opostos.

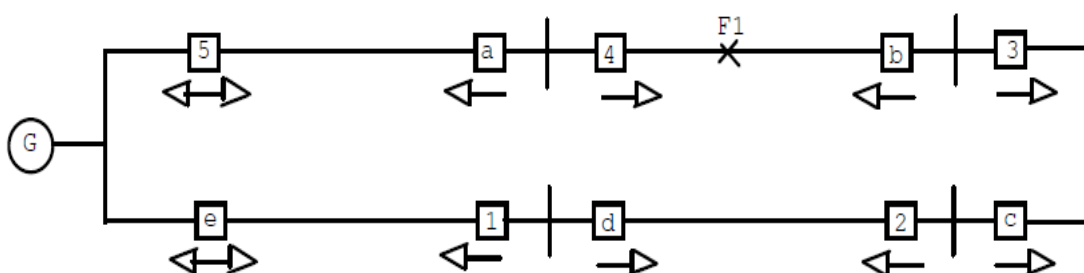


Figura 2.4 Representação de um sistema em anel protegido por relés direcionais de sobrecorrente (<http://www.selinc.com.br/produtos/SEL-451-5.aspx> acessado em: 23/07/2013 14:33)

No caso dos relés direcionais de sobrecorrente, há uma união entre as funções de sobrecorrente e direcional. O relé de sobrecorrente pode ser instantâneo e/ou temporizado. Quanto ao tempo de atuação, possuem curvas características de dois tipos: de **tempo definido** e de **tempo dependente**.

a) De tempo definido (Figura 2.5)

Uma vez ajustado o tempo de atuação (t_a) e a corrente mínima de atuação ($I_{MIN,AT}$), o relé irá atuar neste tempo para qualquer valor de corrente igual ou maior do que o mínimo ajustado .

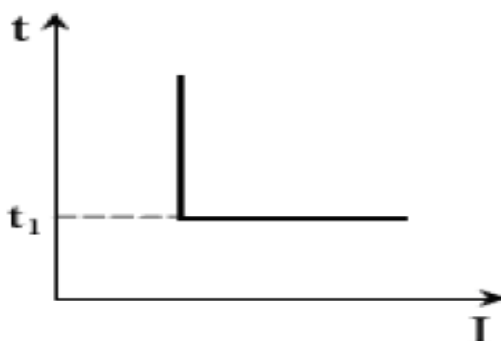


Figura 2.5 Curva de tempo definido.

b) De tempo dependente (Figura 2.6)

O tempo de atuação do relé é inversamente proporcional ao valor da corrente. Isto é, o relé irá atuar em tempos decrescentes para valores de corrente igual ou maior do que a corrente mínima de atuação. As curvas de tempo dependente são classificadas em três grupos: **Normalmente Inversa (NI)**, **Muito Inversa (MI)** e **Extremamente Inversa (EI)**.

Para garantir uma atuação adequada da proteção, é necessário ajustar o t_{ap} da unidade temporizada do relé segundo a inequação (2.7):

$$(1,4 \text{ a } 1,5)I_{nominal \text{ de carga}} \leq I_{ajuste \text{ do relé}} \leq \frac{I_{curto \text{ mínimo no fim do trecho protegido}}}{1,5} \quad (2.7)$$

Portanto, o relé deve suportar sem operar, às situações de flutuação de carga. Por isso, recomenda-se que o seu ajuste seja de 40% a 50% da corrente nominal de carga e menor do que 50% da corrente de curto circuito para se ter absoluta segurança que o relé atuará em caso de defeito.

Para a unidade instantânea o ajuste deve ser feito conforme a seguinte expressão:

$$I_{ajuste\ instant\neao} = I_{85\% cc3\Phi} \quad (2.8)$$

Sendo:

$$I_{85\% cc3\Phi} = \frac{I_{cc3\Phi A} \cdot I_{cc3\Phi B}}{0,85 \cdot I_{cc3\Phi A} + 0,15 \cdot I_{cc3\Phi B}} \quad (2.9)$$

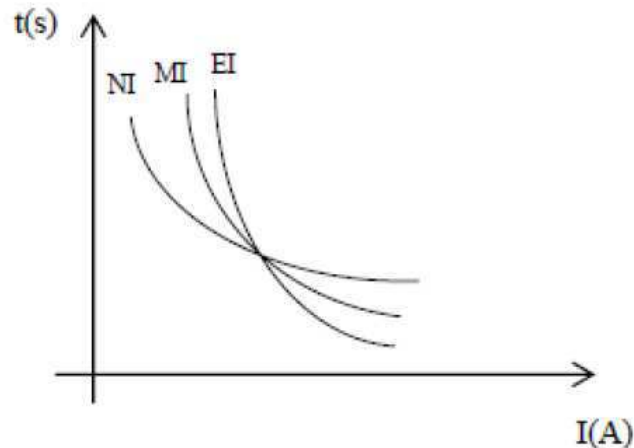


Figura 2.6 Curvas de tempo dependente.

2.5.1 RELÉS ELETROMECHANICOS

São considerados os primeiros relés e têm sido gradativamente substituídos pelos relés digitais. As principais partes constituintes de um relé eletromecânico são:

- Eletroímã - constituído por fio de cobre em torno de um núcleo de ferro maciço que fornece um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético;
- Armadura de ferro móvel;
- Conjuntos de contatos;
- Mola de rearme;
- Terminais.

Uma unidade direcional eletromecânica é apresentada na Figura 2.7, com o respectivo diagrama fasorial correspondente. Existem duas grandezas de entrada,

uma de operação (corrente de uma fase do sistema) e uma de referência (tensão ou corrente) e atuam quando a defasagem angular entre essas grandezas está em uma determinada faixa de valores.

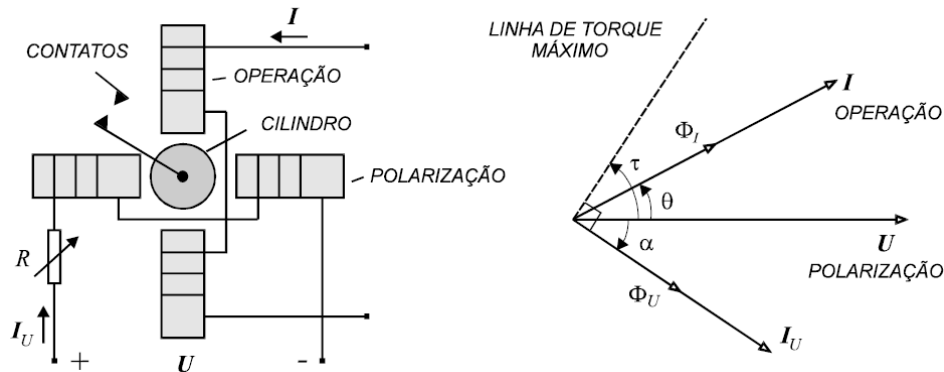


Figura 2.7 Relé direcional (GUERRA, 2013).

O funcionamento de um relé eletromecânico de sobrecorrente se baseia na indução de correntes parasitas em um cilindro metálico, as bobinas são percorridas por corrente alternada, criando um fluxo magnético variante no tempo no entreferro. I e I_u são defasadas no tempo e R possui a função de variar o ângulo α entre U e I_u . O torque é dado pela expressão a seguir:

$$T = KUI \cos(\theta - \tau) \quad (2.10)$$

Apresentam-se na Figura 2.8 as regiões de operação e não-operação do relé direcional.

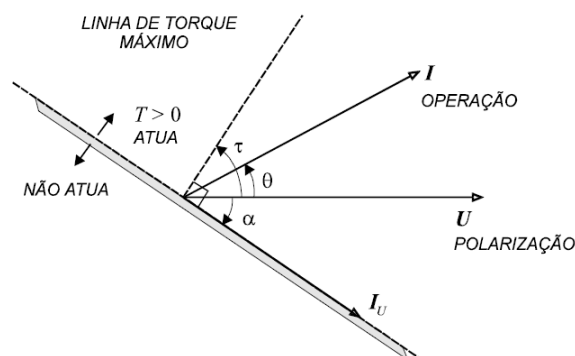


Figura 2.8 Diagrama fasorial e regiões de operação do relé (GUERRA, 2013).

2.5.2 RELÉS ESTÁTICOS OU ELETRÔNICOS

Com o surgimento dos relés eletrônicos, problemas de consumo e desgaste das partes móveis que eram característicos dos relés eletromecânicos foram superados. Entretanto, novos problemas surgiram, tais como: envelhecimento de seus componentes, rápido desgaste causado pelas intempéries do tempo como temperatura e umidade além da vulnerabilidade na presença de surtos atmosféricos ou manobras.

A comparação fasorial de duas grandezas, característica intrínseca dos relés direcionais, pelos relés estáticos é feita conforme mostrado na Figura 2.9, segundo a condição de operação:

$$\left| \frac{U}{Z} + I \right| > \left| \frac{U}{Z} - I \right| \quad (2.11)$$

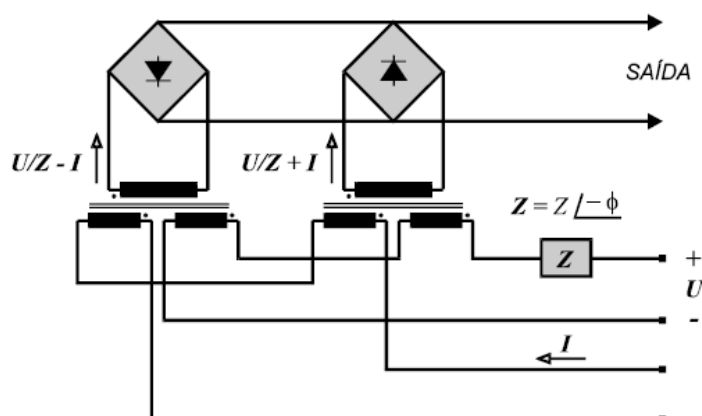


Figura 2.9 Relé direcional estático (GUERRA, 2013).

2.5.3 RELÉS DIGITAIS

Com o advento da tecnologia digital, o desenvolvimento de relés com múltiplas facilidades e flexibilidade se tornou possível. Funções de controle, localização de defeitos e oscilografia foram incorporadas, resultando no aumento da confiabilidade do esquema de proteção. A utilização de grupos de ajustes e lógicas programáveis trouxe uma extrema gama de opções para a configuração da proteção e adaptação às filosofias de proteção.

Apesar de ser a tecnologia mais moderna em proteção digital e estar substituindo os relés eletromecânicos e estáticos, os relés digitais não são perfeitos e possuem alguns problemas, tais como: sensibilidade a surtos, a interferências eletromagnéticas e a altas temperaturas. Apresenta-se na Figura 2.10 a fotografia de um relé digital.



Figura 2.10 Relé digital da SEL (<http://www.selinc.com.br/produtos/SEL-451-5.aspx> acessado em: 23/07/2013 14:33)

O diagrama de blocos apresentado na Figura 2.11 resume a arquitetura de um relé digital típico.

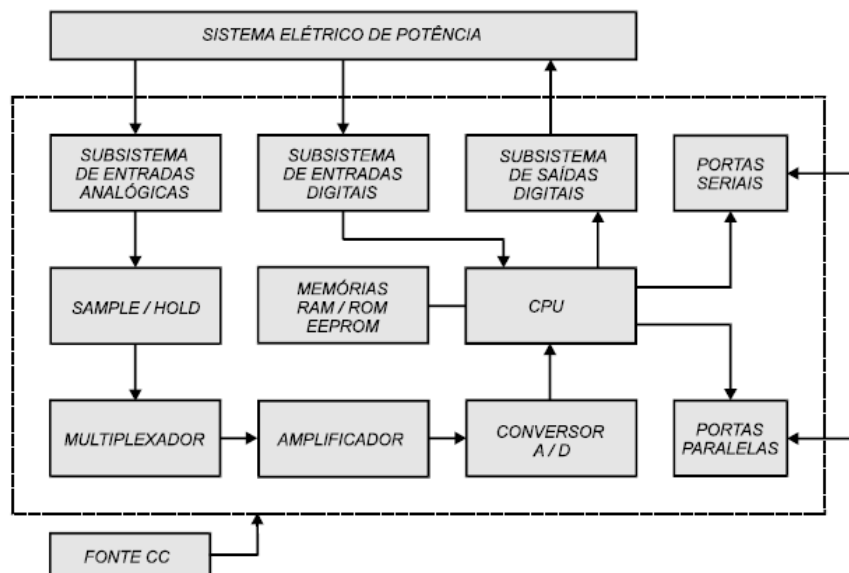


Figura 2.11 Diagrama de blocos de um relé digital típico (GUERRA, 2013).

De forma sucinta o princípio de funcionamento de um relé digital típico é o seguinte: o relé recebe os sinais analógicos através dos TC e TP. Para não tornar os sinais indistinguíveis depois de uma amostragem, estes são submetidos a um filtro com corte menor ou igual a 480 Hz no subsistema de entradas analógicas, em

seguida são amostrados, armazenados e multiplexados. Com o uso de um conversor A/D os sinais analógicos são convertidos para a forma digital. Desta forma, o processador do relé será capaz de processar os dados, os quais são armazenados temporariamente na memória RAM. Na memória ROM, é feita a armazenagem permanente de programas do relé digital, tais como: algoritmos matemáticos de detecção e classificação de defeitos, além dos parâmetros de ajustes do relé. Os dados oriundos do conversor A/D e do subsistema de entrada digital, responsável por informar o estado lógico de chaves seccionadoras e disjuntores, são processados na CPU, que consiste em um microprocessador que toma as decisões de atuação ou não do relé. A comunicação entre a rede e o relé é realizada através portas seriais e paralelas.

2.6. PROCESSO DE COORDENAÇÃO DE RELÉS

Na proteção de sistemas elétricos, é desejável que os relés atuem o mais rápido possível. De um modo geral, a estratégia de proteção consiste em coordenar os relés em uma escada de tempos de atuação sucessivos, porém sempre considerando a seletividade de proteção. Para isso, o relé mais próximo do defeito deve atuar prioritariamente. Caso falhe, o relé a montante mais próximo será o responsável pela proteção e assim, sucessivamente (Figura 2.12).

O sistema em anel pode, para efeito de proteção, ser interpretado como dois sistemas elétricos radiais, característica conferida pelos relés direcionais de mesma direção.

A mínima diferença de tempo entre dois relés próximos da cadeia de proteção é denominada de tempo de atuação (Δt). Assim para haver coordenação, os tempos de operação dos relés devem satisfazer a seguinte inequação:

$$t_{relé\ a\ montante} - t_{relé\ a\ jusante} \geq \Delta t \quad (2.12)$$

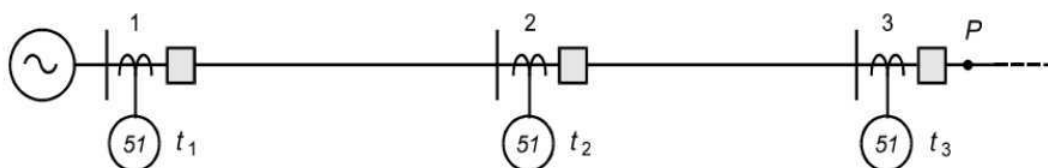


Figura 2.12 Esquema de proteção de retaguarda.

3. O SOFTWARE CAPE

O software CAPE (*Computer Aided Protection Engineering*) foi desenvolvido pela *Electrocon International Inc.* e tem como objetivo principal, auxiliar os engenheiros responsáveis pela proteção dos sistemas de transmissão de alta tensão e sistemas de distribuição em concessionárias de energia elétrica.

O CAPE conta com um banco de dados em código aberto para modelagens detalhadas e oferece suporte para redes de qualquer tamanho, sendo possível o projeto da proteção, simulação de faltas e a análise do fluxo de potência.

A área de trabalho do CAPE é ilustrada na Figura 3.1, onde existem três campos distintos. O campo descrito como *Árvore de dados* contém todos os equipamentos inseridos no diagrama unifilar, sendo possível acessá-los e ajustá-los de forma rápida. O CAPE disponibiliza também um campo para a parte gráfica onde é possível desenhar e visualizar o diagrama unifilar desejado e logo acima, um campo destinado à saída dos resultados em forma de relatório.

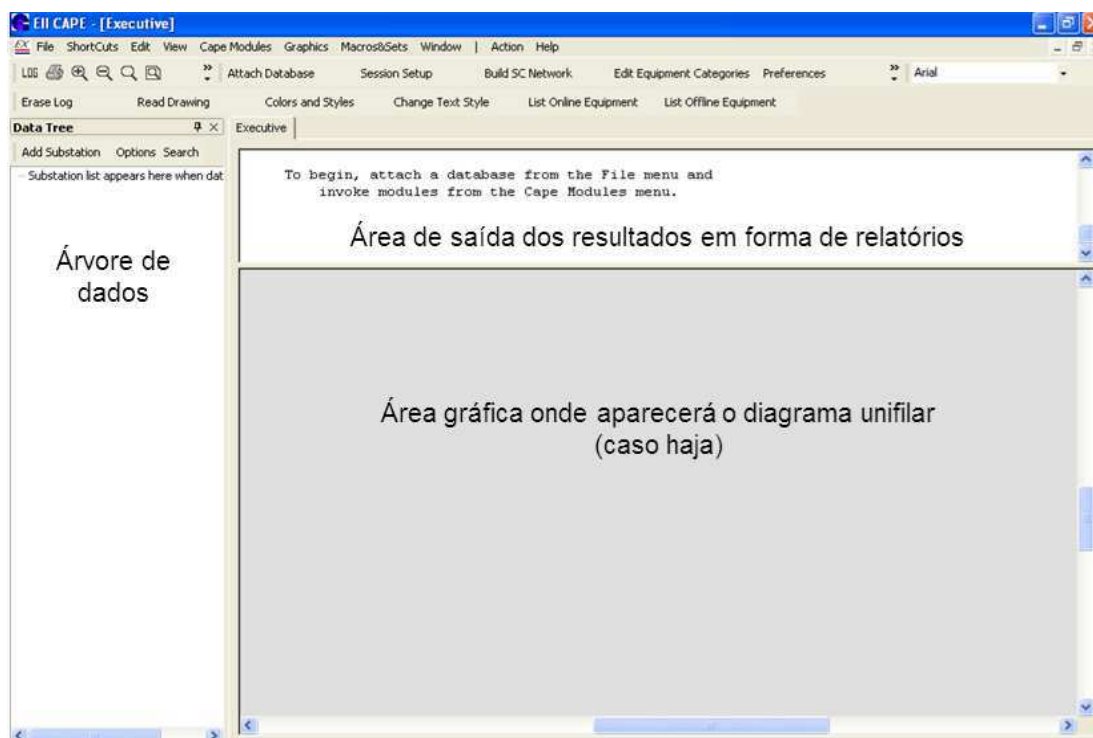


Figura 3.1 Área de trabalho do CAPE.

3.1. MÓDULOS DO CAPE

O CAPE possui onze módulos com funções específicas e de fundamental importância para análise e projeto da proteção do sistema elétrico, conforme breve descrição a seguir:

- ***Database Editor:*** É a base para todas as funções. Oferece modelos para construção de modelo de transformadores, relés, religadores e fusíveis;
- ***Short Circuit:*** Calcula falta em sistemas de qualquer tamanho. Suporta relatórios padrão e personalizados, estudos de falhas automáticas, análise de localização de falhas, e as condições de falha definidas pelo usuário.
- ***One-Line Diagram:*** Módulo responsável pela construção do diagrama unifilar;
- ***Coordination Graphic:*** Módulo que ajuda na avaliação gráfica da coordenação dos dispositivos de proteção, avalia os efeitos de eventuais modificações além de ser possível manipular graficamente as curvas, sendo a regulação da unidade de proteção feita de forma gráfica.
- ***System Simulator:*** Módulo responsável pela simulação de defeitos na rede elétrica e avaliação da coordenação das proteções;
- ***Relay Setting:*** Módulo destinado exclusivamente a parametrização dos relés;
- ***Relay Checking:*** Permite avaliar o comportamento do sistema de proteção em face de um conjunto de defeitos pré-definidos ao longo de toda a rede;

- ***Line Constants:*** Módulo responsável por calcular a impedância de seqüência positiva própria e a impedância de seqüência zero própria e mútua de linhas aéreas de transmissão baseada nos dados do condutor e da torre;
- ***Order Production:*** Módulo responsável por gerar relatórios de ajustes do relé baseado em taps e pontos de teste para locais específicos;
- ***Power Flow:*** Módulo responsável pela solução do fluxo de potência através do método de Newton;
- ***Short Circuit Reduction:*** Módulo que oferece duas opções de redução da rede.

4. ESTUDO DE CASO

Para realizar o Estudo de Caso, utilizou-se o sistema apresentado na Figura 4.1, o qual será denominado de **sistema-teste**. Ele é composto dos seguintes componentes: duas fontes (S1, S2), linhas de transmissão, transformadores, disjuntores, relés e um motor síncrono (S3). Os parâmetros físicos dos componentes são fornecidos no Anexo A e os cálculos dos TC e parâmetros dos relés, no Anexo B.

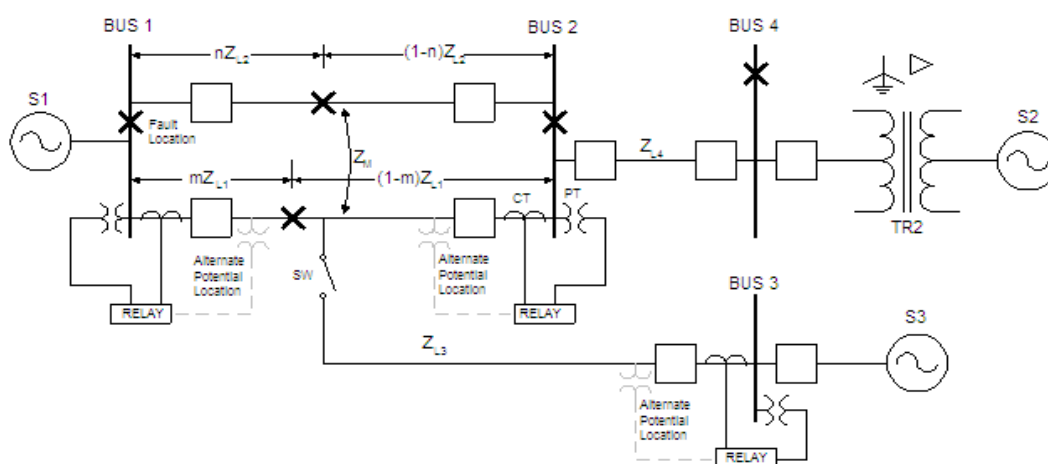


Figura 4.1 Sistema-teste (Disponível em: http://www.pes-prc.org/Reports/archive/Apublications_old_format.html, Acesso em: 17 julho, 2013, 16:30:30.)

4.1. INICIANDO A SIMULAÇÃO

Para efetuar as simulações no CAPE é necessário inserir o sistema-teste, o que é feito no módulo *One Line Diagram*. O projeto é iniciado acessando *file>Create New Data Base and Drawing*. Abre-se então, a janela mostrada na Figura 4.2, na qual se nomeia o arquivo do projeto e anexa-se a base de dados, para em seguida criar o desenho do diagrama unifilar. Caso se deseje utilizar um diagrama unifilar já armazenado, basta marcar a opção *Read Graphics File* e escolher o arquivo a ser apresentado.

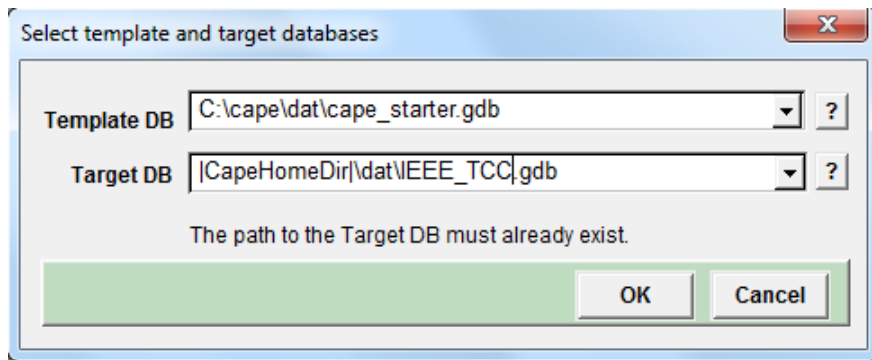


Figura 4.2 Menu de seleção da base de dados e *template*.

O módulo *One Line Diagram* disponibiliza todos os dispositivos necessários para o projeto (Figura 4.3), dando liberdade ao projetista em escolher os itens requeridos apenas selecionando-os e arrastando-os para a área de trabalho do CAPE.

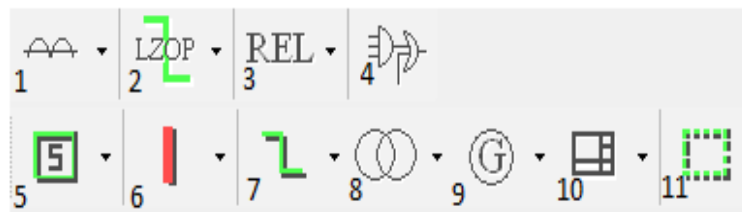


Figura 4.3 Itens do módulo One Line Diagram.

4.2. BARRAS

As barras são inseridas através do ícone 6 da Figura 4.3. Em seguida, é necessário posicioná-las na área de trabalho do CAPE. O CAPE fornece então, uma janela semelhante à mostrada na Figura 4.4, na qual é possível nomear a barra, estabelecer o tipo e o nível de tensão. As barras em vermelho são de 230 kV e as barras em verde são de 24 kV. Inseriu-se uma barra fictícia entre as barras 1 e 2 para que fosse possível efetuar a derivação na linha por meio do *software*, dado que o CAPE não possui essa função específica.

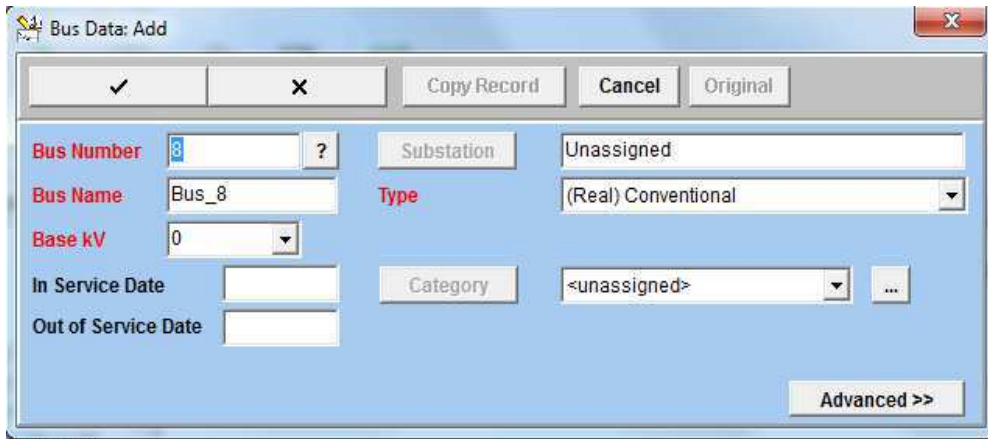


Figura 4.4 Menu de configuração das barras.

4.3. LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para inserir as linhas de transmissão, as barras precisam estar posicionadas na área de trabalho. Para isso, basta selecionar as barras de início e de fim. A linha então, será adicionada automaticamente. O comprimento e a impedância (em pu, ohms ou percentual) são inseridos conforme mostrado na Figura 4.5.

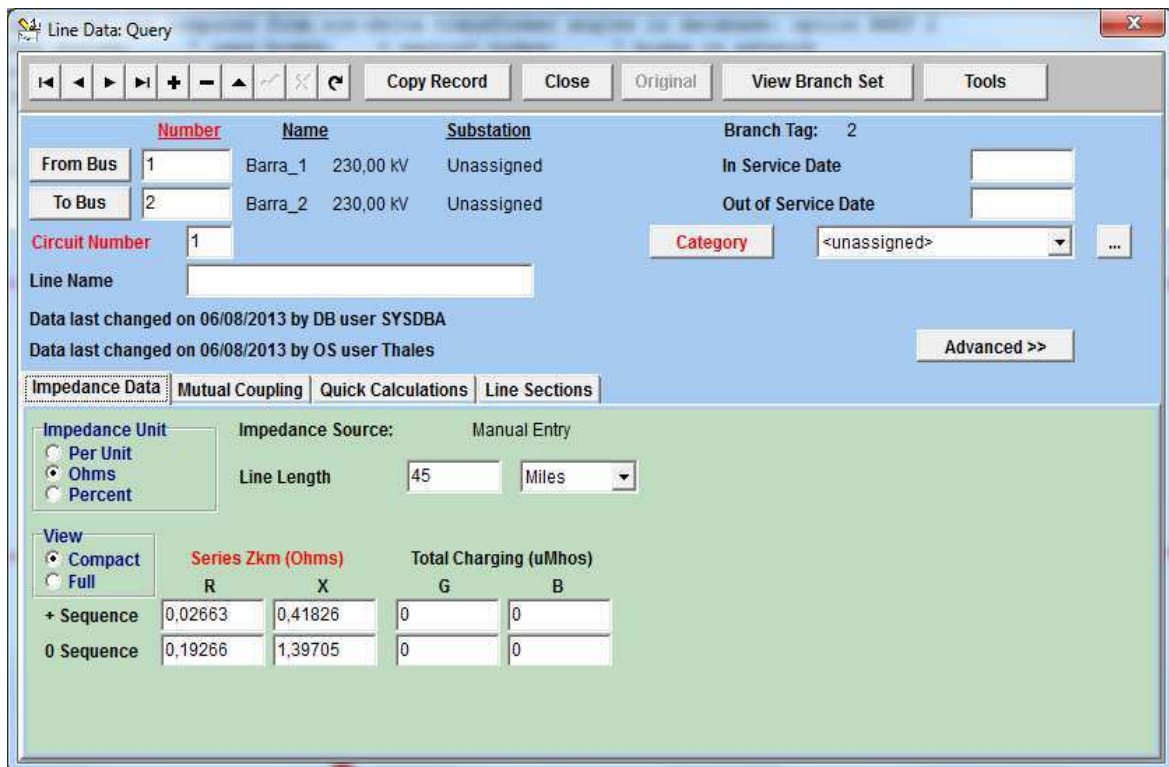


Figura 4.5 Menu de configuração de linhas.

4.4. MOTORES E GERADORES

O motor síncrono S_2 e os geradores S_1 e S_3 são fornecidos no ícone 9 da Figura 4.3 e são inseridos com um simples clique na barra desejada. O *menu* de configuração é mostrado na Figura 4.6, no qual o usuário pode efetuar a configuração, escolhendo potência, fator de potência, impedância, tensão e impedância de aterramento.

	Resistance	Reactance	
Positive Sequence	0,00000	0,00000	Subtransient (X''d)
Zero Sequence	0,00000	0,00000	

Figura 4.6 Menu de configuração dos geradores e motores.

4.5. TRANSFORMADORES

Para inserir um transformador deve-se primeiro criá-lo através da seleção do ícone 8 da Figura 4.3. Logo em seguida, o *menu* da Figura 4.7 será exibido e os

valores da tensão do primário e secundário poderão ser inseridos em *Add kV Tap* no canto inferior esquerdo, além dos respectivos tipos de conexão em *Connection During Testing*. É possível também nomeá-lo e ajustar as perdas e a potência. Com o transformador criado, é necessário selecionar as barras onde se deseja posicioná-lo para que este seja adicionado.

The screenshot shows the 'Transformer Library: Add' dialog box. It includes a toolbar with buttons for 'Copy Record', 'Cancel', 'Original', and 'Show Associated Transformer(s)'. The main area is divided into several sections:

- Manufacturer:** A dropdown menu with a question mark.
- Name:** A text input field.
- Number of Windings:** A dropdown menu set to '2'.
- Include Winding-TANK Z0:** A checkbox that is currently unchecked.
- Magnetizing Admittance:** A section with a 'Remarks' tab and a dropdown for 'Enter data in' set to 'per unit'.
- Sequence:** A table for entering G (pu) and B (pu) values for Positive, Negative, and Zero sequences.

Sequence:	Positive	Negative	Zero
G (pu)	0	0	0
B (pu)	0	0	0

 A note '(Negative B is inductive)' is present.
- Circuit Designation:** A section with 'P' and 'S' tabs.

Connection during testing	P	S
Connection during testing	Wye	Wye
Shared Neutral Group	0	0
MVA Rating 1	0	0
MVA Rating 2	0	0
MVA Rating 3	0	0
MVA Rating 4	0	0
- Impedance Form:** A dropdown menu set to 'Percent Z and Loss'.
- Sequence Selection:** Tabs for 'Positive Sequence', 'Zero Sequence', and 'IEC Correction'.
- Table:** A table with columns for 'Circuit', 'Tap kV', 'First kV', 'First Angle', 'Second kV', 'Second Angle', 'Base MVA', '%Z', and 'Loss (kW)'. The 'Circuit' column is currently empty.
- Buttons:** 'Add kV Tap' and 'Delete kV Tap' buttons are located at the bottom left.

Figura 4.7 Menu de configuração dos transformadores.

4.6. ZONAS DE PROTEÇÃO

As zonas de proteção são inseridas a partir do ícone 2 da Figura 4.3. Logo em seguida, o *menu* da Figura 4.8 será exibido, no qual é possível nomear a zona, estabelecer seu tipo e localização.

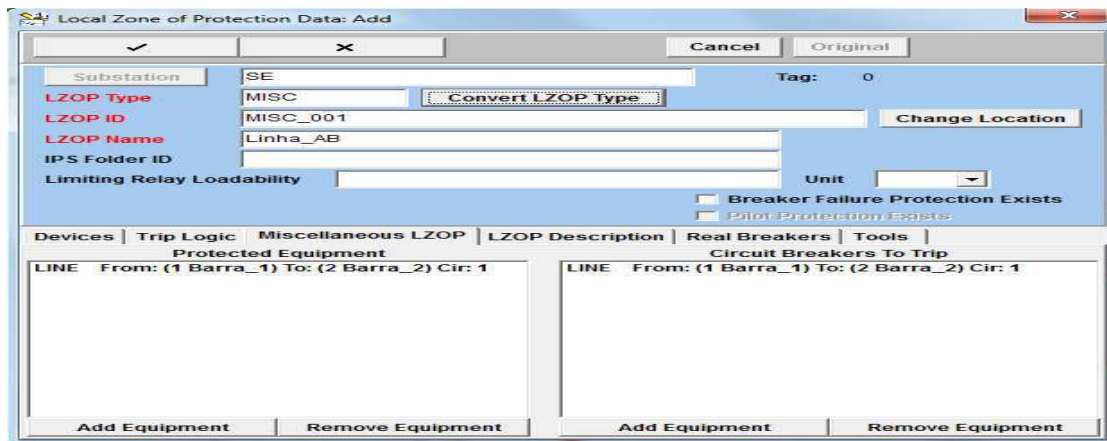


Figura 4.8 Menu de inserção das zonas de proteção.

4.7. TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTOS

Os transformadores para instrumentos TC e TP são adicionados a partir da seleção do ícone 1 da Figura 4.3. Logo em seguida, o *menu* da Figura 4.9 é apresentado, no qual estão disponíveis os campos para determinar as características desejáveis do equipamento segundo o projeto, como polaridade, relação de transformação, conexão e nome do equipamento.

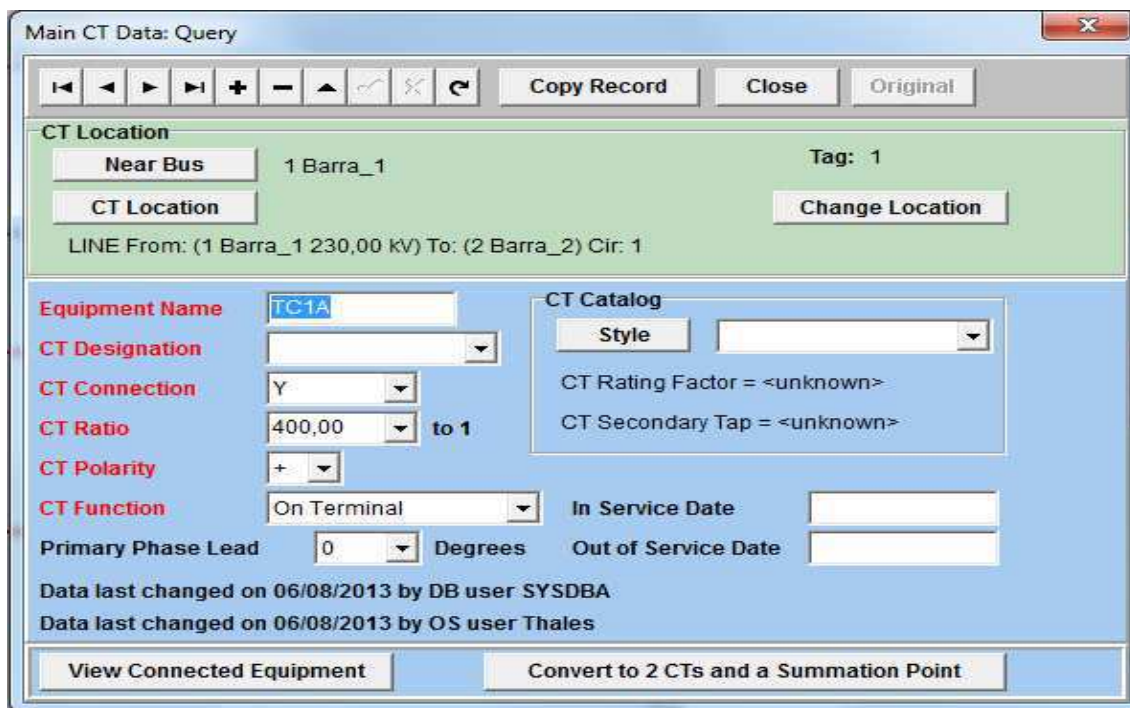


Figura 4.9 Menu de inserção dos TC.

4.8. DIAGRAMA UNIFILAR

No ícone 3 da Figura 4.3 é possível selecionar os tipos de relés. Neste Trabalho, foram escolhidos quatro unidades do relé direcional de sobrecorrente PL-200, localizadas na parte em anel do sistema, e duas unidades do relé de sobrecorrente IAC51A, localizadas na parte radial do sistema. O diagrama unifilar obtido é apresentado na Figura 4.10.

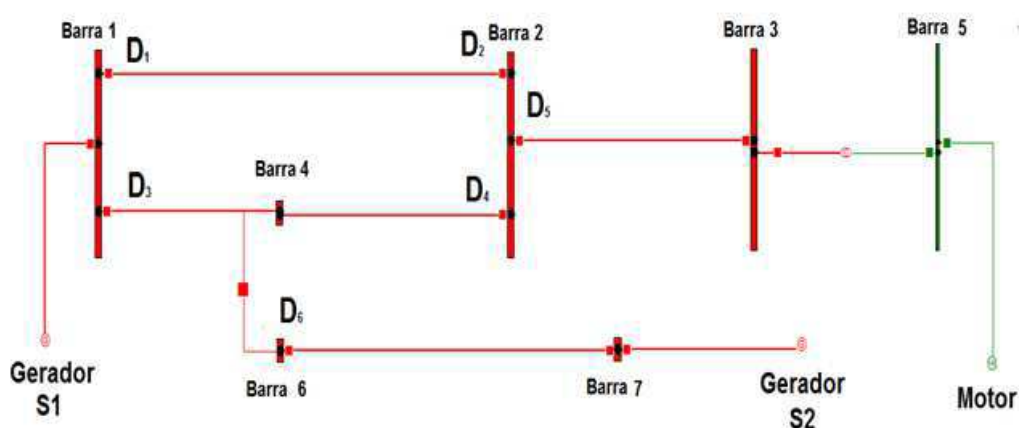


Figura 4.10 Diagrama unifilar obtido no CAPE.

4.9. PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS

O módulo *Relay Setting* é o módulo responsável pela parametrização dos relés. Uma vez selecionado, basta acessar *Set Relay* e o CAPE fornece a janela mostrada na Figura 4.11, na qual é possível escolher o algoritmo desejado, uma breve explicação do mesmo é exibida na parte de baixo da janela. Ao selecionar e clicar em *OK*, o algoritmo solicitará vários parâmetros, os quais são utilizados no processo de configuração dos relés.

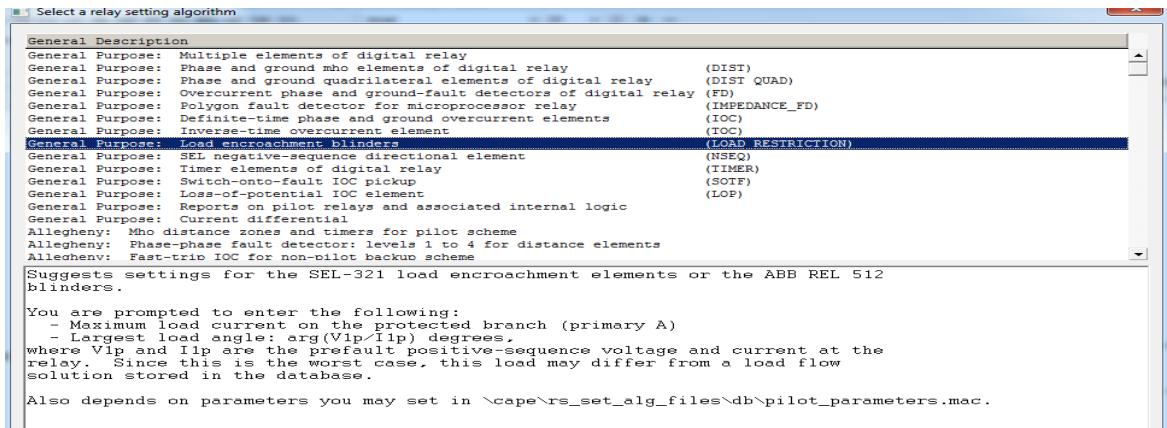


Figura 4.11 Janela para seleção do algoritmo do relé.

Para os relés de sobrecorrente, selecionou-se a opção *General Purpose : Inverse-time overcurrent element (TOC)*, esta função irá configurar a corrente instantânea e a unidade de corrente inversa, conforme figura 4.12, basta selecionar os elementos desejados(item 1), e inserir as correntes máxima da carga no primário(item 3) e a corrente inversa mínima de pick-up(item 4).

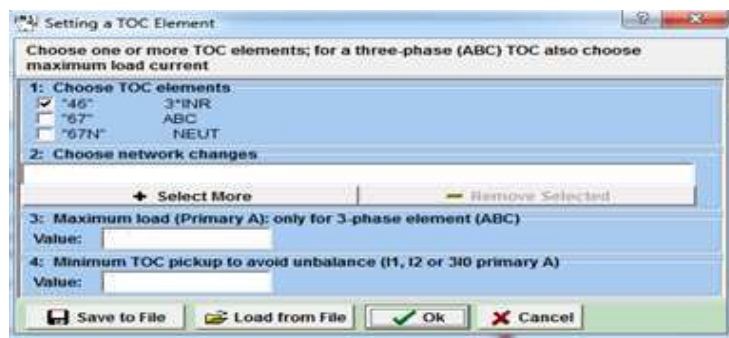


Figura 4.12 Configuração dos relés de sobrecorrente

Para os relés direcionais, selecionou-se *Training: Directional Overcurrent*, em seguida, várias opções são exibidas no campo destinado a relatórios, conforme figura 4.13. Selecionou-se os elementos 4 e 7 e em seguida, clicando em *OK*, utilizou-se os valores *default* do programa na medida em que o mesmo solicitava novos parâmetros para efetuar o ajuste dos relés.

```

Relay elements:
1      4 DIR '67'
2      4 DIR '67N'
3      4 IOC '46'
4      4 IOC '67'
5      4 IOC '67N'
6      4 IOC '46'
7      4 TOC '67'
8      4 TOC '67N'
9      4 TIMER 'T46' 1
10     4 TIMER 'T67' 1
11     4 TIMER 'T67N' 1
12     4 AUX 'ENABLE_67N_IOC'
13     4 AUX 'ENABLE_67N_TOC'
14     4 AUX 'ENABLE_67_IOC'
15     4 AUX 'ENABLE_67_TOC'

```

Figura 4.13 Opções para configuração

4.10. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O módulo *System Simulator* permite simular as faltas e conferir a atuação dos relés e a abertura dos disjuntores. Os quadrados vermelhos representam os disjuntores no estado fechado e os quadrados brancos são os disjuntores com terminais abertos, conforme se pode observar nas figuras a seguir. Nota-se o compromisso com a seletividade, onde a falta em uma linha não resultou na abertura desnecessária dos disjuntores em outras linhas, mas apenas no trecho com falta.

- Falta entre as barras 1 e 2 no sistema-teste na configuração em anel.

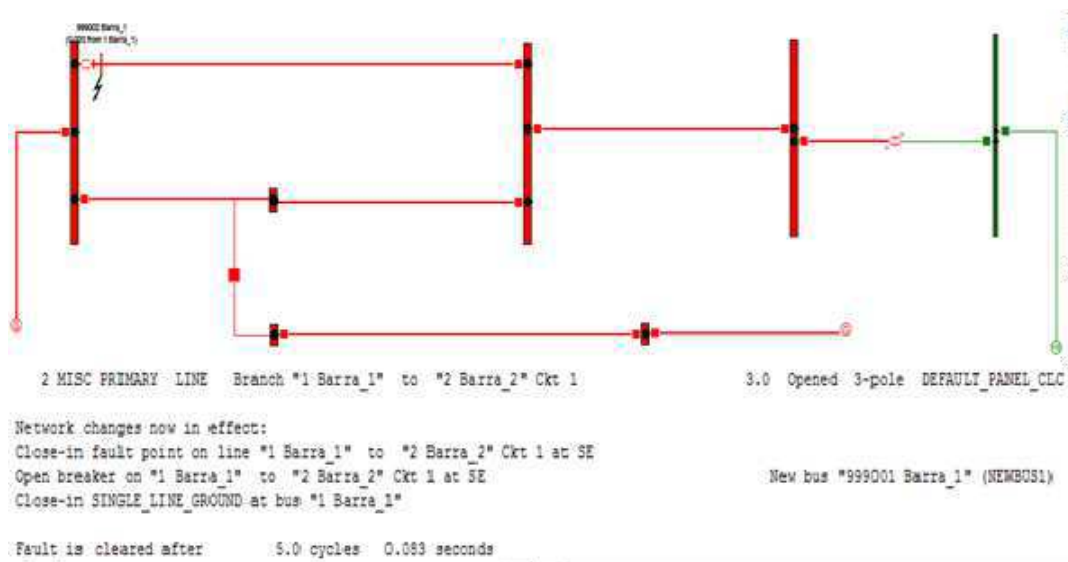


Figura 4.14 Falta entre as barras 1 e 2.

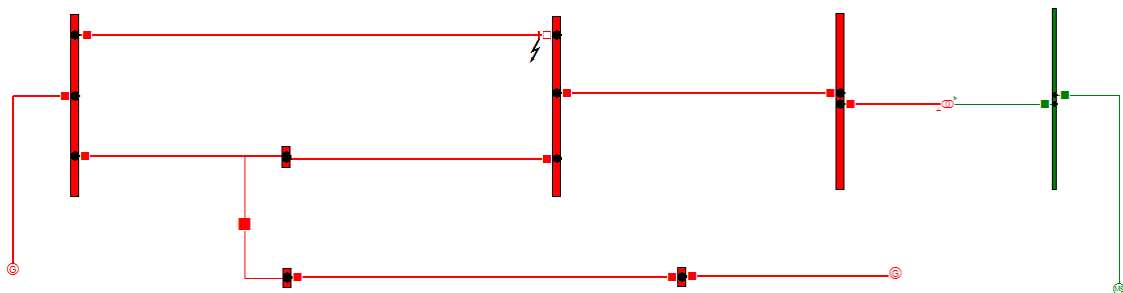


Figura 4.13 Falta entre as barras 1 e 2.

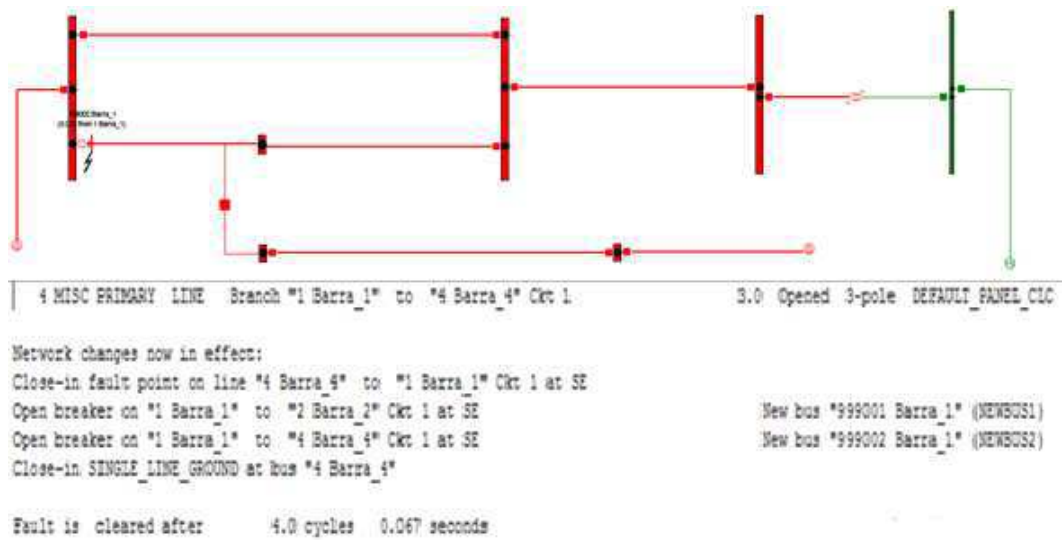


Figura 4.14 Falta entre as barras 1 e 2.

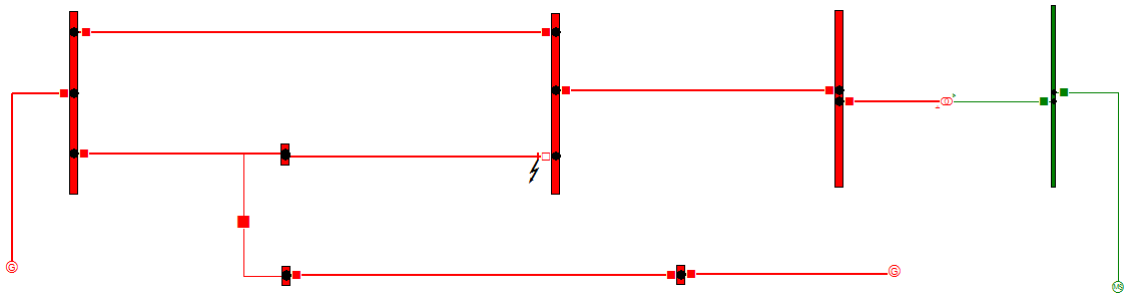


Figura 4.15 Falta entre as barras 1 e 2.

- Falta entre as barras 5 e 6 no sistema-teste na configuração radial.

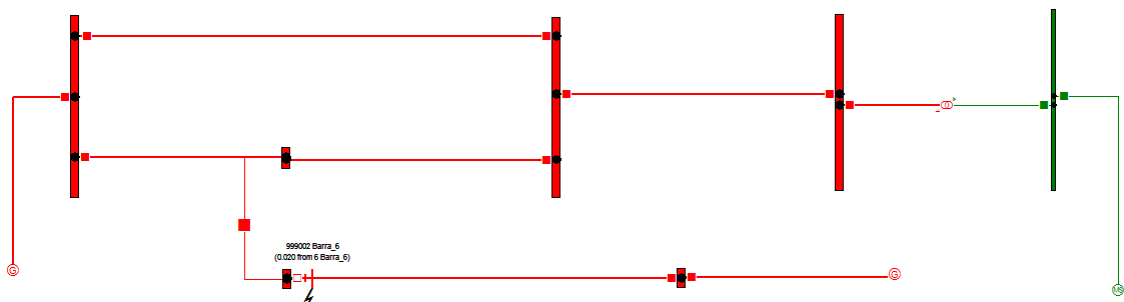


Figura 4.16 Falta entre as barras 5 e 6.

- Falta entre as barras 2 e 3 no sistema-teste na configuração em anel.

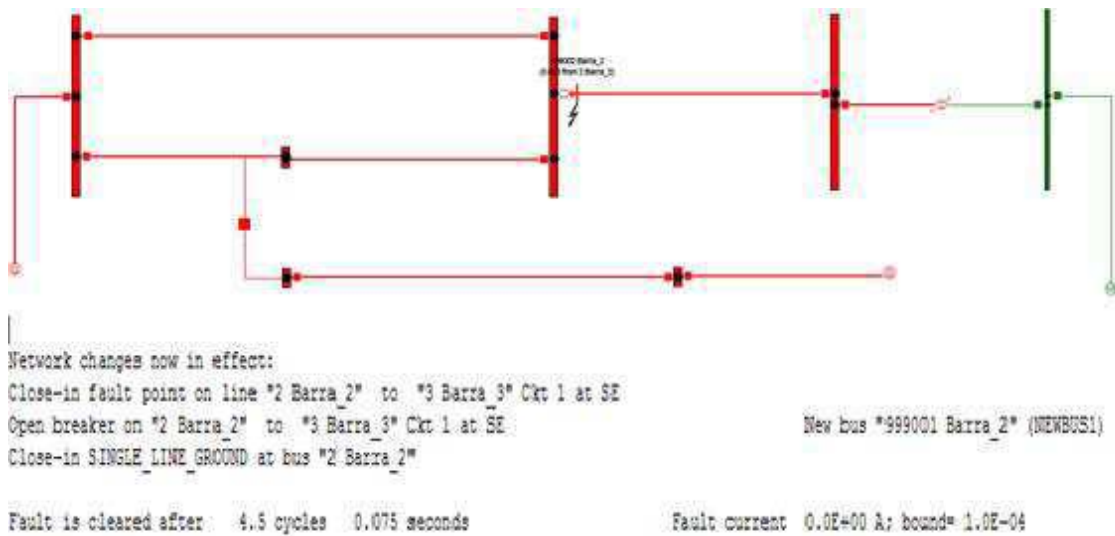


Figura 4.17 Falta entre as barras 2 e 3.

Com o ajuste dos relés realizado, pode-se através do módulo *Coordination Graphics*, efetuar a avaliação gráfica da coordenação dos dispositivos de proteção e manipular a curva de atuação dos mesmos, de modo a obter a resposta necessária ao projeto. O usuário escolhe o dispositivo de proteção a ser exibido arrastando ele da árvore de dados para a área de trabalho. As curvas de tempo inverso, em que o tempo em ciclos é dado em função da corrente em *Ampères*, para o relé de sobrecorrente são apresentadas nas figuras a seguir.

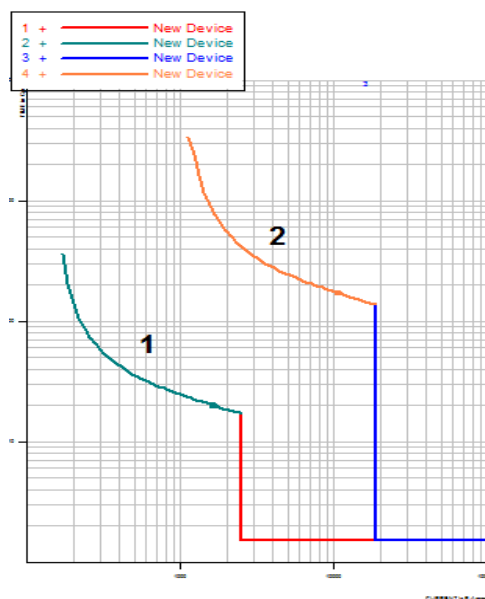


Figura 4.18 Curvas dos relés de sobrecorrente.

A curva do relé de sobrecorrente 1 representa o relé entre as barras 2 e 3 e a curva 2 representa o relé entre as barras 6 e 7.

As figuras a seguir ilustram as curvas obtidas para os relés direcionais de sobrecorrente e também representam o tempo em ciclos em função da corrente em *Ampères*.

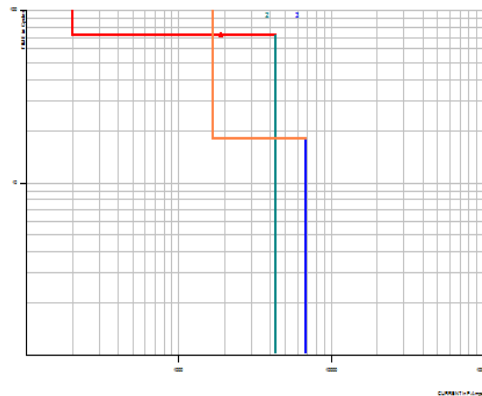


Figura 4.19 Relé direcional de sobrecorrente.

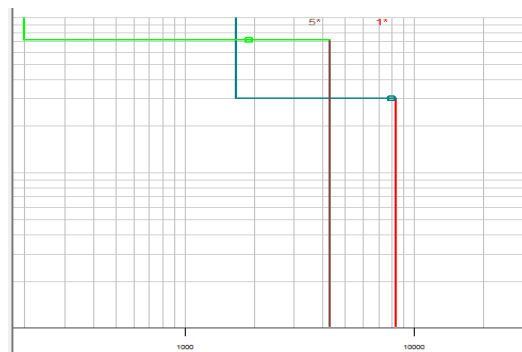


Figura 4.20 Relé direcional de sobrecorrente.

Nota-se que muitas vezes as curvas estão afastadas umas das outras. Isso se deve ao compromisso com a coordenação, em que o relé mais próximo a falta deve atuar primeiro.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do caráter introdutório do estudo realizado, este Trabalho de Conclusão de Curso mostrou o enorme potencial do *software* CAPE e que se constitui em uma ferramenta para os engenheiros de proteção de sistemas elétricos.

Em relação ao Estudo de Caso realizado, conceitos importantes foram estudados e aprofundados, como por exemplo: sistemas em anel, relé direcional de sobrecorrente e os fundamentos da filosofia da proteção.

Ao final, pode-se afirmar que o estudo realizado agregou conhecimentos importantes à formação do autor deste Trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

<http://www.selinc.com.br/produtos/SEL-451-5.aspx> acessado em: 23/07/2013 14:33. (s.d.).

ABNT - NBR 6821. *Transformadores de Corrente - Especificação*. (1992).

NBR 6855 *Transformadores de potencial - Especificação*. (1992).

Disponível em: http://www.pes-psrc.org/Reports/archive/Apublications_old_format.html.
(Acesso em: 17 julho. 2013, 16:30:30.).

Almeida, M. (2000). *Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos*. Natal, Brasil.

Blackburn J.L, D. T. (2007). *Protective Relaying: Principles and Applications* (3 ed.). United States: CRC Press.

GUERRA, F. (2013). *Proteção de Sistemas Elétricos Notas de Aula*. Campina Grande, Brasil.

Kindermann, G. (1999). *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência Vol.1* (1 ed.). Florianópolis, Brasil: UFSC-EEL-LabPlan.

Nexans. (2013). *All Aluminium Conductor - AAC (KCMIL Series)*.

ANEXO A

FONTES IDEAIS

No sistema-teste as fontes S1 (conectada a barra 1) e S3 (conectada a barra 3) são modelados como fontes ideais e consistem em fontes senoidais com impedância equivalente de Thévenin.

FUNTE S1 (230 kV)

Impedância de sequência Positiva $Z_1 = 6.1 + j16.7\Omega$.

Impedância de sequência Zero $Z_0 = 2.7 + j8.37\Omega$

FUNTE S3 (230 kV)

Impedância de sequência Positiva $Z_1 = 0.69 + j4.12\Omega$

Impedância de sequência Zero $Z_0 = 0.34 + j4.77\Omega$

MÁQUINA SÍNCRONA (S2)

No sistema-teste a máquina S2 é conectada a barra 4 e modelada como uma máquina síncrona.

Tensão kV: 24 kV

Potência MVA: 830 MVA

Resistência da armadura R_a : 0.00199 Ω

Reatância de sequência positiva X_l : 0.15 pu

Reatância de sequência Zero X_0 :	0.145 pu
Reatância síncrona de eixo direto X_d :	1.89 pu
Reatância síncrona de eixo em quadratura X_q :	1.8 pu
Reatância transiente de eixo direto X'_d :	0.23 pu
Reatância transiente de eixo em quadratura X'_q :	0.435 pu
Reatância sub-transiente de eixo direto X''_d :	0.1775 pu
Reatância sub-transiente de eixo em quadratura X''_q :	0.177 pu
Constante de tempo de circuito aberto transitória de eixo direto T'_{do} :	4.2s
Constante de tempo de circuito aberto transitória de eixo em quadratura T'_{qo} :	0.589s
Direct-axis transient open-circuit time constant T''_{do} :	0.031s
Quadrature-axis transient open-circuit time constant T''_{qo} :	0.063s

Todas as impedâncias por fase estão na base da máquina: 830 MVA, 24 kV.

TRANSFORMADOR (CONECTADO A FONTE S2)

No sistema-teste o transformador possui conexões $Y_{aterrado}/\Delta$ com dois enrolamentos com os seguintes parâmetros:

Enrolamento de alta tensão:

Tensão: 229.893 kV

MVA: 725 MVA

Resistência: 0.1469 Ω

Enrolamento de baixa tensão:

Tensão: 22.8 kV

MVA: 725 MVA

Resistência: 0.0044 Ω

Corrente de excitação a 100% de tensão: 0.706 A

Perdas a 100% de excitação: 466.303 kW

Teste de curto-circuito:

229.893 kV na base de 22.8 kV e 725MVA:

%Z: 9.21

Perdas: 1333.689kW

As grandezas de sequência-zero são consideradas as mesmas que as grandezas de sequência positiva.

LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 230kV

O sistema-teste possui três linhas de transmissão de 230kV. Uma linha conectando as barras 1 e 2, uma linha entre a barra 1 e a barra 3, uma terceira linha conectada entre as barras 2 e 4. Cada linha possui 72,42 km de comprimento.

As linhas são constituídas por condutores Marigold 1113 Kcmil AA, com diâmetro de 0,031 m e resistência DC de 0.051 Ω /Km (Nexans, 2013) a 75°C. Os parâmetros das linhas são calculados a 60 Hz com resistência a terra de 50 Ω -m.

Tabela A.1 Configuração das torres das linhas em anel.

Condutores	Separação horizontal da referência (m)	Altura da torre (m)	Altura do meio vão (m)
1	0.0	30,48	22,25
2	0.0	25,451	17,221
3	0.0	20,422	12,192
4	8,8392	20,422	12,192
5	8,8392	25,451	17,221
6	8,8392	30,48	22,25

Tabela A.2 Configuração das torres das linhas radiais de 230 kV.

Condutores	Separação horizontal da referência (m)	Altura da torre (m)	Altura do meio vão (m)
1	0.0	30,48	22,25
2	0.0	25,451	17,221
3	0.0	20,422	12,192

Para o cálculo das impedâncias de sequência positiva e zero da linha de transmissão utilizou-se o módulo *Line Constants* do *software* ATP, cujas linhas de código são apresentadas na Figura A.1.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Cálculos de Parâmetros de Linhas de Transmissão
C Thales Morais Braga Lyra
C -----
LINE CONSTANTS
METRIC
C Estrutura para entrada de dados para cabos individuais
C >SK-->RES-->REA---->DIAM--->HORIZ-->VTW---->VM----->
  0.0  0.051 4          0.031    0.0  30.48  22.25
  0.0  0.051 4          0.031    0.0  25.451 17.221
  0.0  0.051 4          0.031    0.0  20.422 12.192
  0.0  0.051 4          0.031  8.8392 20.422 12.192
  0.0  0.051 4          0.031  8.8392 25.451 17.221
  0.0  0.051 4          0.031  8.8392  30.48  22.25

BLANK card ending conductor cards
C Demais dados
C RHO-->FREQ----->FCAR----->ICP-->IZP-->----->
  50.0   60.0         1   111   111  1

BLANK card ending frequency cards
BLANK card ending line constants case
BEGIN NEW DATA CASE
  
```

Figura A.1 Linha de código para determinar a impedância da linha de transmissão.

Os valores obtidos foram:

Sequence	Surge impedance magnitude(ohm) angle(degr.)	Attenuation db/km	velocity km/sec	wavelength km	Resistance ohm/km	Reactance ohm/km	Susceptance mho/km
Zero :	8.23227E+02 -3.92585E+00	1.01876E-03	2.20580E+05	3.67634E+03	1.92657E-01	1.39705E+00	2.08097E-06
Positive:	3.28041E+02 -1.82148E+00	3.52730E-04	2.95224E+05	4.92040E+03	2.66297E-02	4.18262E-01	3.89467E-06

Figura A.2 Resultados de saída do módulo *Line Constants*.

Portanto, as impedâncias de sequência zero e positiva para o caso das linhas de circuito duplo:

$$Z_0 = (0,192657 + 1,39705) \Omega/\text{km}$$

$$Z_1 = (0,0266297 + 0,418262) \Omega/\text{km}$$

Para as demais linhas:

$$Z_0 = (0,219299 + 1,86171) \Omega/\text{km}$$

$$Z_1 = (0,0532503 + 0,819040) \Omega/\text{km}$$

ANEXO B

CORRENTES NOMINAIS DE CARGA

As correntes nominais de carga foram obtidas do módulo *Power Flow* do CAPE, conforme mostrado na Tabela B.1.

Tabela B.1 Correntes de carga nominal.

I_n nominal de carga	A
I _{D1} nominal de carga	1061
I _{D2} nominal de carga	1061
I _{D3} nominal de carga	1063
I _{D4} nominal de carga	1063
I _{D5} nominal de carga	1203
I _{D6} nominal de carga	93

CÁLCULOS DAS RELAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO DOS TC

Para realizar a parametrização dos relés é necessário dimensionar os TC e TP. Isso é feito aplicando a equação (2.6), seguindo a Norma P-EB-251 da ABNT e utilizando os dados de curto-circuito fornecidos pelo CAPE mostrados na Tabela B.2.

Tabela B.2 Correntes de curto-circuito máxima.

I_{pDn}	A
I _{pD1}	11113,1
I _{pD2}	4329,6
I _{pD3}	10202
I _{pD4}	3317,5
I _{pD5}	5327,9
I _{pD6}	5111,5

$$I_{pD1} = \frac{11113,1}{20} = 555,6A \quad RTC_{D1} = 600/5$$

$$I_{pD2} = \frac{4329,6}{20} = 216,48A \quad RTC_{D2} = 250/5$$

$$I_{pD3} = \frac{10202}{20} = 510,1A \quad RTC_{D3} = 600/5$$

$$I_{pD4} = \frac{3317,5}{20} = 165,87A \quad RTC_{D4} = 200/5$$

$$I_{pD5} = \frac{5327,9}{20} = 266,35A \quad RTC_{D5} = 300/5$$

$$I_{pD6} = \frac{5111,5}{20} = 255,6A \quad RTC_{D6} = 250/5$$

PARAMETRIZAÇÃO DOS RELÉS

O uso da inequação (2.7) permite calcular os valores teóricos da corrente de ajuste dos relés de fase (51) das linhas de transmissão, conforme mostrado a seguir.

$$(1,4 \text{ a } 1,5)I_{nominal \text{ de carga}} \leq I_{ajuste \text{ do relé}} \leq \frac{I_{curto \text{ mínimo no fim do trecho protegido}}}{1,5}$$

$$\frac{1,5 \cdot 1061}{100} \leq I_{ajuste \text{ do relé}D1} \leq \frac{2427,45}{1,5 \cdot 100}$$

$$15,91 \leq I_{ajuste \text{ do relé}D1} \leq 16,18$$

$$I_{ajuste \text{ do relé}D1} = 16 A$$

$$\frac{1,5 \cdot 1061}{50} \leq I_{ajuste \text{ do relé}D2} \leq \frac{2427,45}{1,5 \cdot 50}$$

$$31,83 \leq I_{ajuste \text{ do relé}D2} \leq 32,36$$

$$I_{ajuste \text{ do relé}D2} = 32A$$

$$\frac{1,5 \cdot 1063}{100} \leq I_{ajuste \text{ do relé}D3} \leq \frac{3277,92}{1,5 \cdot 100}$$

$$15,94 \leq I_{ajuste \text{ do relé}D3} \leq 21,85$$

$$I_{ajuste \text{ do relé}D3} = 16A$$

$$\frac{1,5 \cdot 1063}{40} \leq I_{ajuste \text{ do relé}D4} \leq \frac{3277,92}{1,5 \cdot 40}$$

$$39,86 \leq I_{ajuste\ do\ reléD4} \leq 54,63$$

$$I_{ajuste\ do\ reléD4} = 40A$$

$$\frac{1,5.1203}{60} \leq I_{ajuste\ do\ reléD5} \leq \frac{2237}{1,5.60}$$

$$16,08 \leq I_{ajuste\ do\ reléD5} \leq 28,07$$

$$I_{ajuste\ do\ reléD5} = 16A$$

$$\frac{1,5.93}{50} \leq I_{ajuste\ do\ reléD6} \leq \frac{1902,31}{1,5.50}$$

$$2,79 \leq I_{ajuste\ do\ reléD6} \leq 25,36$$

$$I_{ajuste\ do\ reléD6} = 3A$$

Para ajustar a unidade instantânea(50) é necessário utilizar a equação(2.8)

$$I_{ajuste\ instantâneo} = I_{85\% \ cc3\Phi}$$

Sendo:

$$I_{85\% \ cc3\Phi} = \frac{I_{cc3\Phi A} \cdot I_{cc3\Phi B}}{0,85 \cdot I_{cc3\Phi A} + 0,15 \cdot I_{cc3\Phi B}}$$

As correntes de falta trifásicas obtidas no CAPE em cada barra estão dispostas na Tabela B.3.

Tabela B.3 Corrente de curto circuito trifásico em cada barra.

Corrente em cada barra ($I_{cc3\Phi n}$)	(A)
$I_{cc3\Phi 1}$	10689,0
$I_{cc3\Phi 2}$	6485,00
$I_{cc3\Phi 3}$	3899,55
$I_{cc3\Phi 4}$	8540,17
$I_{cc3\Phi 5}$	37370,0
$I_{cc3\Phi 6}$	8540,17
$I_{cc3\Phi 7}$	33987,2

$$I_{85\% \text{ cc}3\Phi D1} = \frac{10689.6485}{100(0,85.10689 + 0,15.6485)} = 68,91 \text{ A}$$

$$I_{85\% \text{ cc}3\Phi D2} = \frac{10689.6485}{50(0,15.10689+0,85.6485)} = 19,48 \text{ A}$$

$$I_{85\% \text{ cc}3\Phi D3} = \frac{10689.8540,17}{100(0,85.10689+0,15.8540,17)} = 97,41 \text{ A}$$

$$I_{85\% \text{ cc}3\Phi D4} = \frac{8540,17.6485}{40(0,85.8540,17 + 0,15.6485)} = 168,19 \text{ A}$$

$$I_{85\% \text{ cc}3\Phi D5} = \frac{6485.3899,55}{60(0,85.6485+0,15.3899,55)} = 69,12 \text{ A}$$

$$I_{85\% \text{ cc}3\Phi D6} = \frac{8540,17.33987,2}{50(0,85.8540,17+0,15.33987,2)} = 469,77 \text{ A.}$$

