



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA



ESTUDO DOS RELÉS ELETROMECAÑICOS AOS DIGITAIS NOS  
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

## TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Aluno:** Pedro Manoel Costa Gondim

**Matrícula:** 20421155

**Professor Orientador:** Francisco das Chagas F. Guerra

Campina Grande, Paraíba

Outubro 2010

**PEDRO MANOEL COSTA GONDIM**

**ESTUDO DOS RELÉS ELETROMECAÂNICOS AOS DIGITAIS  
NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

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 Engenharia  
Elétrica.

Campina Grande, Paraíba

Outubro 2010

**PEDRO MANOEL COSTA GONDIM**

**ESTUDO DOS RELÉS ELETROMECAÂNICOS AOS DIGITAIS  
NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

**Data de Aprovação**      \_\_ / \_\_ / \_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Francisco das Chagas F. Guerra

Universidade Federal de Campina Grande

**Professor Orientador**

---

Professor Convidado

Universidade Federal de Campina Grande

**Avaliador**

Campina Grande, Paraíba

Outubro 2010

*Dedico este trabalho a minha amada filha Maria Clara.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a DEUS, que sempre foi a minha maior fonte de forças.

À minha mãe Idalina, que com toda a sua calma e dedicação sempre esteve do meu lado, não medindo esforços para me ajudar.

Aos meus irmãos José Carlos e Ana Camila, por toda a amizade e companheirismo.

À minha filha Maria Clara, por me trazer tanta felicidade.

E a todos os meus amigos que contribuíram durante minha estadia em Campina Grande.

Ao professor Francisco das Chagas F. Guerra, pela orientação e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

O sistema elétrico de potência tem, como uma das principais metas, garantir economicamente a qualidade do serviço e assegurar uma vida razoável às instalações e equipamentos elétricos. O relé realiza um papel fundamental nessas metas, sendo um dos principais dispositivos de proteção no sistema elétrico de potência. Historicamente o relé começou como um dispositivo eletromecânico, com o passar do tempo surgiram novas tecnologias e o relé pôde ser aprimorado, passando a ser projetado como dispositivo-semicondutor, a partir de então surgiu o relé estático.

Com a era da informática, surgiram os relés com microprocessadores, os chamados relés digitais.

Apesar da evolução e aprimoramento dos relés, todos tendem a buscar as mesmas características funcionais como sensibilidade, seletividade, velocidade de atuação e confiabilidade.

Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise dos relés eletromecânicos, estáticos e digitais e por fim realizar um estudo sobre o relé SEL-351A, mostrando o seu funcionamento e suas principais aplicações, tendo como finalidade mostrar de maneira prática a atuação dos principais relés digitais utilizados atualmente nas subestações.

# SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>CAPÍTULO I – Introdução.....</b>	<b>11</b>
1.1 Apresentação.....	11
1.2 Organização do trabalho.....	12
<b>CAPÍTULO II – Relé.....</b>	<b>13</b>
2.1 Definições do relé.....	13
2.2 Finalidades do relé.....	13
2.3 Classificações dos relés.....	14
2.4 Características funcionais da proteção por Relés.....	14
2.5 Qualidades requeridas de um relé.....	16
<b>CAPÍTULO III – Relé Eletromecânico e Estático.....</b>	<b>17</b>
3.1 Relé Eletromecânico.....	17
3.1.1 Relé Elementar Eletromecânico.....	17
3.1.2 Reles de atração- Armadura Axial.....	18
3.1.3 Relés de Atração – Armadura em Charneira.....	19
3.1.4 Relé de Indução – Disco de Indução.....	19
3.1.5 Relé de Indução – Tambor de Indução.....	20
3.1.6 Relé de D Arsonval.....	21
3.1.7 Vantagens e Desvantagens dos Relés Eletromecânicos.....	22

3.2	Relé estático.....	22
3.2.1	Vantagens e Desvantagens dos Relés Estáticos.....	24
<b>CAPÍTULO IV – Relé digital.....</b>		<b>25</b>
4.1	Relé Digital.....	25
4.2	O desenvolvimento dos Relés Digitais.....	26
4.3	Arquitetura do relé digital.....	27
4.4	Conversor analógico digital A/D.....	29
4.5	Filtro <i>Anti-Aliasing</i> .....	31
4.6	Benefícios da Proteção Digital.....	33
<b>CAPÍTULO V – Relé SEL-351A.....</b>		<b>35</b>
5.1	Funções de Proteção.....	36
5.2	Algumas aplicações.....	37
5.3	Software.....	38
5.4	A programação Lógica.....	40
5.5	Comunicação.....	42
5.6	AcSELerator Analytic Assistant .....	43
5.7	Funções de Medição.....	44
5.8	Funções de Monitoramento.....	44
5.9	Outras Características.....	45
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>		<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>47</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 3.1 - esquema de um relé elementar.....	18
Figura 3.2 - relé de atração tipo axial.....	18
Figura 3.4 - relé de atração tipo charneira.....	19
Figura 3.5 - relé tipo disco de indução.....	20
Figura 3.6 - relé tipo tambor.....	21
Figura 3.7 - relé tipo D`Arsonval.....	21
Figura 3.8 - diagrama de blocos para um relé estático genérico.....	23
Figura 3.9 - relé estático para proteções diferenciais em torno de transformadores e barramentos.....	24
Figura 4.1 - painel de controle de subestação com relés digitais modelo SEL-351S.....	27
Figura 4.2 - arquitetura do Relé digital.....	29
Figura 4.3 - princípio de operação de um multiplexador.....	29
Figura 4.4 - princípio do conversor A/D.....	30
Figura 4.5 - amostragem de um sinal.....	30
Figura 4.6 - resposta em frequência do filtro passa-baixa ideal.....	31
Figura 4.7 - representação do fenômeno de sobreposição de espectros.....	32
Figura 4.8 - resposta em frequência dos filtros butterworth e chebyshev.....	32
Figura 5.1: do relé com Botoeiras dedicadas para comando seguro de fechamento e abertura do disjuntor.....	35
Figura 5.2: sem botoeiras.....	35
Figura 5.3: Diagrama funcional do Relé SEL351A.....	36

Figura 5.4: Aplicação do sistema de proteção do Relé em todo sistema de potência.....	38
Figura 5.5: tela de iniciação do software ACSELERATOR QuickSet.....	39
Figura 5.6: A Tela principal do ACSELERATOR QuickSet.....	40
Figura 5.7: criando gráficos de lógica.....	41
Figura 5.8: colocando as entradas lógicas disponíveis na opção inputs.....	41
Figura 5.9 colocando saídas lógicas disponíveis na opção outputs.....	42
Figura 5.10: conjunto de relés ligado ao computador por meio de processador de Comunicações.....	42
Figura 5.11: mostra as componentes de fases e seqüências de fases.....	43
Figuras 5.12: mostra o gráfico do sistema.....	43
Figura 5.13: mostra os fasores analógicos e de seqüência.....	44

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Os relés de proteção são uns dos mais importantes dispositivos de proteção do Sistema Elétrico de Potência. Os primeiros relés projetados eram dispositivos eletromecânicos[5]. Este tipo de relé era projetado e construído utilizando forças produzidas pela interação eletromagnética entre correntes e fluxos, tal como ocorre em um motor. Seu princípio de operação envolve parâmetros concernentes a uma determinada relação entre suas entradas, que geralmente são sinais de tensão e corrente, e suas saídas que são do tipo (*on-off*) dos contatos do relé.

Com o passar do tempo os sistemas de potências foram se expandindo e com isso a crescente necessidade dos sistemas de proteção mais confiáveis e com alto desempenho. Isso foi alcançado com o desenvolvimento de relés utilizando-se dispositivos semicondutores, geralmente, referidos como relés estáticos[5]. O termo estático é caracterizado pela ausência de movimentos mecânicos, pois eram construídos com dispositivos eletrônicos tais como resistores, capacitores, diodos etc. Todas as características e funções contidas nos relés convencionais estão presentes nos relés estáticos com as vantagens de seus componentes necessitarem de baixa potência.

Com o desenvolvimento da tecnologia digital, deu-se início ao desenvolvimento dos relés computadorizados ou digitais[5]. Tal tipo de dispositivo é gerenciado por um microprocessador específico, controlado por um *software*, onde os dados de entrada são digitalizados. Os princípios de funcionamento dos relés convencionais são uma referência para o seu desenvolvimento, obtendo, com o fato de um processador ser usado para tarefa de proteção, uma abordagem mais sofisticada na solução de algumas limitações encontradas na tecnologia analógica.

## **ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

No seu conjunto, este trabalho contém 5 capítulos, considerando a introdução. Na “Introdução”, estão apresentadas a importância do relé e sua evolução, como também os relés que serão abordados neste trabalho.

No capítulo 2, cujo título é “Relé” é feita uma abordagem geral dos relés destacando por tópicos suas definições, finalidades, classificação, características funcionais e suas qualidades. No capítulo 3, cujo título é “Relé Eletromecânico Estático”, será abordado o funcionamento básico do relé eletromecânico e estático, suas vantagens e desvantagens e alguns tipos de relé eletromecânicos. O capítulo 4, “Relé digital”, aborda de maneira mais detalhada o relé digital, mostrando sua arquitetura e seu benefício no sistema elétrico de potência.

Por fim, no capítulo 5 “Relé SEL-351A”, irá abordar seu funcionamento e suas principais aplicações.

# CAPÍTULO 2

## RELÉS

### 2.1 Definições dos Relés

O relé é um dispositivo elétrico destinado a produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída, quando alcançadas determinadas condições no circuito de entrada, que controla o dispositivo. Assim, o relé não possui a função de interromper o circuito principal, mas sim de fazer atuar o seu sistema de manobra.

Segundo a ABNT, o relé de proteção é um dispositivo destinado a detectar anormalidades no sistema elétrico, atuando diretamente sobre um equipamento ou um sistema, retirando de operação os equipamentos e componentes envolvidos com a anormalidade, acionando circuitos de alarme quando necessário. Por outro lado, também pode ser o elemento que, satisfeitas certas condições de normalidade, irá dar a permissão para a energização de um equipamento ou de um sistema

### 2.2 Finalidades do Relé

- **Monitoramento-** verificar condições do SEP, como por exemplo, detectores de falta, monitores de canais de comunicação, etc.
- **Proteção-** responsável por comandar a abertura de um ou mais disjuntores quando da existência de um defeito.
- **Religamento-** responsável pelo religamento de linhas de transmissão.
- **Regulador-** é utilizado quando algum parâmetro de monitoramento do SEP desvia-se dos limites operacionais determinados, como por exemplo, relé regulador de tensão.
- **Auxiliar-** opera em resposta a decisão de funcionamento de outro rele, alguns exemplo de relé auxiliar são relés temporizadores, multiplicadores de contato, etc.
- **Sincronismo-** assegura a existência de adequadas condições para realizar a interconexão entre dois SEPs distintos.

## 2.3 Classificação dos Relés

- **Tipo construtivo:** eletrodinâmico, disco de indução, elemento térmico, fotoelétrico, digital, etc.;
- **Natureza do parâmetro ao qual o relé responde:** corrente, tensão, potência, frequência, pressão, temperatura, etc.;
- **Grandezas físicas de atuação:** elétricas, mecânicas, térmicas, óticas, etc.;
- **Conexão do elemento sensível:** direto no circuito primário, através de transformadores de potência e transformadores de corrente;
- **Grau de importância:** principal ou intermediário;
- **Tipo de contatos:** normalmente aberto ou normalmente fechado;
- **Tempo de atuação:** instantâneo ou temporizado;
- **Tipo de fonte para atuação do elemento de controle:** CA ou CC;
- **Aplicação:** geradores, transformadores, linhas de transmissão, etc.

## 2.4 Características funcionais da proteção por Relés

É importante ressaltar que a função de um relé, aplicado a um sistema de proteção, é de remover de serviço alguns elementos ou componentes que estão operando de maneira inadequada, o que caracteriza uma situação de falta. Logo, estes não previnem situações perigosas aos equipamentos, mas somente atuam tão rápido quanto possível após algumas anomalias terem sido detectadas, buscando manter a integridade e estabilidade do sistema remanescente. Neste contexto, os relés devem propiciar determinadas características funcionais essenciais a um sistema de proteção.

- **Sensibilidade:** diz respeito à capacidade do sistema de proteção em responder às anormalidades nas condições de operação, e aos curtos-circuitos para os quais foram projetados. É apreciado por um fator de sensibilidade, dado na seguinte forma:

$$K = \frac{I_{cc \min}}{I_{pp}}$$

Em que  $I_{cc}$  é calculado para curto-circuito franco no extremo mais afastado do sistema ou seção/porção de uma linha, sob condições de geração mínima e  $I_{pp}$  é a corrente primária de operação da proteção (valor mínimo da corrente de acionamento ou *pickup* característico do equipamento, fornecido pelo fabricante do dispositivo). Os valores usuais de  $k$  encontram-se entre 1,5 e 2.

- **Seletividade:** propriedade do sistema de proteção em reconhecer e selecionar entre aquelas condições para as quais uma imediata operação é requerida, e aquelas condições para as quais nenhuma operação ou retardo de atuação é exigido. Esta propriedade define um índice de segurança dos relés, o qual garante que estes não operem nas faltas para os quais não foram projetados. É definida em termos de regiões sobre um sistema de energia designada por Zonas de Proteção. Cabe frisar que, por esta característica funcional, o relé deve isolar a menor porção possível do sistema defeituoso, permitindo uma adequada operação ao sistema remanescente.
- **Velocidade de atuação:** Esta é, com certeza, uma característica desejável e esperada para se remover o mais possível uma situação de falta. Todavia, o relé deve tomar a sua decisão baseado nas formas de onda de tensão e corrente, as quais são fortemente distorcidas devido aos fenômenos transitórios que seguem da ocorrência de uma falta. Diante de tal situação, o relé deve, então, capturar características essenciais das informações contidas nestas formas de onda sobre os quais tomará uma segura decisão. A relação entre a resposta do relé e o grau de certeza decorrente é uma função inversa do tempo, sendo que esta função denota uma das principais características de todo o sistema de proteção. A velocidade ou rapidez de ação na ocorrência de um curto circuito visa a:
  - diminuir a extensão do dano ocorrido;
  - auxiliar a manutenção da estabilidade das máquinas operando em paralelo;
  - melhorar as condições para re-sincronismo dos motores;
  - assegurar a manutenção de condições normais de operação nas partes sadias do sistema;
  - diminuir o tempo total de paralisação dos consumidores de energia e
  - diminuir o tempo total de não liberação de potência, durante a verificação de dano.

Deve ser lembrado que relé rápido deve estar associado a disjuntores de ação rápida, de modo a contemplar o sistema de proteção como um todo, com um tempo de operação total pequeno. De fato, com o aumento da velocidade da proteção, mais cargas podem ser transportadas sobre um sistema, resultando num aumento na economia global, já que, em virtude desta filosofia, evita-se, às vezes, a necessidade de duplicar certas linhas de transmissão.

- **Confiabilidade:** define-se confiabilidade como probabilidade de um componente, de um equipamento ou de um sistema em satisfazer a função prevista, sob dadas circunstância. Do ponto de vista da engenharia, a confiabilidade dos relés tem dois atributos: pode ser confiável e pode também ser seguro. O relé será confiável se operar somente em condições para as quais foi projetado e, seguro, se o mesmo não operar para qualquer outra situação que por ventura venha a ocorrer sobre o sistema. Logo, o relé será considerado seguro se responder somente a falta que ocorram dentro de sua zona de proteção. Esta última é mais difícil de ser alcançada, já que qualquer falta na vizinhança da localização do relé poderá provocar alterações nas formas de ondas das tensões e correntes capturadas por este. Ainda com respeito a este item, vale apontar que a longa inatividade, seguida de operação em condições difíceis, exige do equipamento de proteção simplicidade e robustez, e isso se traduz na fabricação, empregando-se matéria prima adequada com mão de obra não só capaz, mas também especializada.

## 2.5 Qualidades requeridas de um relé

- Ser tão simples e robustos o quanto possível.
- Ser tão rápidos o quanto possível.
- Ter alta sensibilidade e poder de discriminação.
- Realizar contatos firmes.
- Manter a sua regulagem.
- Ter baixo custo.

# CAPÍTULO 3

## RELÉ ELETROMECAÂNICO E ESTÁTICO

### 3.1 Relé Eletromecânico

O relé eletromecânico tem sua construção baseada num contato metálico que se abre ou fecha sob a influência de campo eletromagnético induzido numa bobina em seu interior. Desse modo, quando os contatos da bobina do rele são percorridos por uma corrente elétrica, ele atrai o contato metálico e abre ou fecha o contato, conforme o modelo de rele utilizado. A seguir demonstraremos a forma mais simples do relé eletromecânico, também conhecido como relé elementar.

#### 3.1.1 Relé Elementar Eletromecânico

Seja um circuito monofásico, contendo uma da Figura 3.1, fonte de tensão ( $U$ ), alimentando uma carga( $Z$ ), do que resulta uma corrente circulante ( $I$ ), nesse circuito foi introduzido um relé elementar, do tipo eletromecânico: uma estrutura em charneira, composta de um núcleo fixo e uma armadura móvel à qual estão solitários o contato móvel e uma mola, o que obriga o circuito magnético ficar aberto em uma posição regulável. O núcleo é percorrido por um fluxo proporcional a corrente do circuito, circulando na bobina do relé, e isso faz com que seja possível que o contato móvel feche um circuito operativo auxiliar (fonte de corrente continua, nesse caso), alimentando um alarme (lâmpada) e/ou o disparador do disjuntor colocado no circuito principal, sempre que  $F_e > F_m$ .

Por motivos de projeto, o valor  $I$  deve ser limitado e assim, sempre que excede um valor prefixado  $I_a$  (denominado corrente de atuação, de picafe, de acionamento ou operação de relé), o circuito deve ser interrompido, por exemplo, pelo fornecimento de um impulso de operação ( $I_{op}$ ) enviando à bobina do disparador do disjuntor, ou pelo menos, ser assinalada aquela ultrapassagem por um alarme ( lâmpada, buzina).

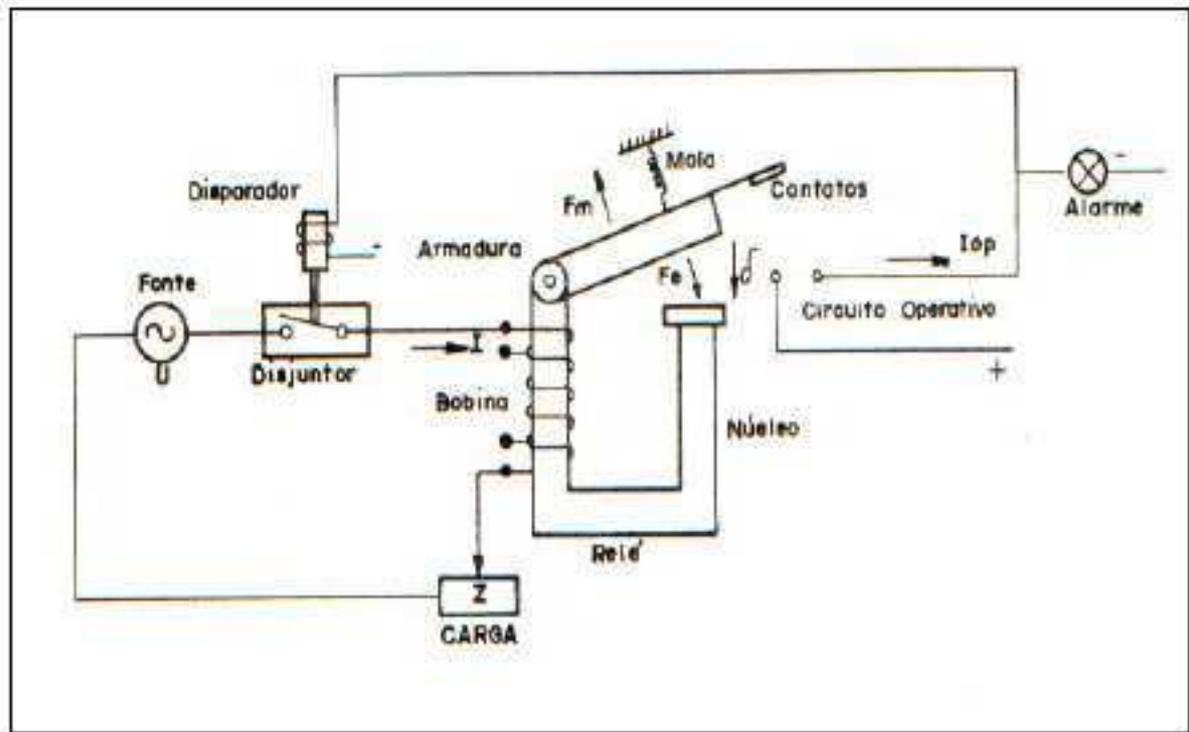


Figura 3.1: esquema de um relé elementar.

### 3.1.2 Reles de atração- Armadura Axial

O relé de atração- Armadura Axial consiste de uma bobina solenóide que, energizada eletricamente, atrai para seu interior um núcleo móvel de ferro. Este núcleo móvel de ferro, quando é atraído, carrega consigo um contato móvel, alinhado a um contato fixo na carcaça.

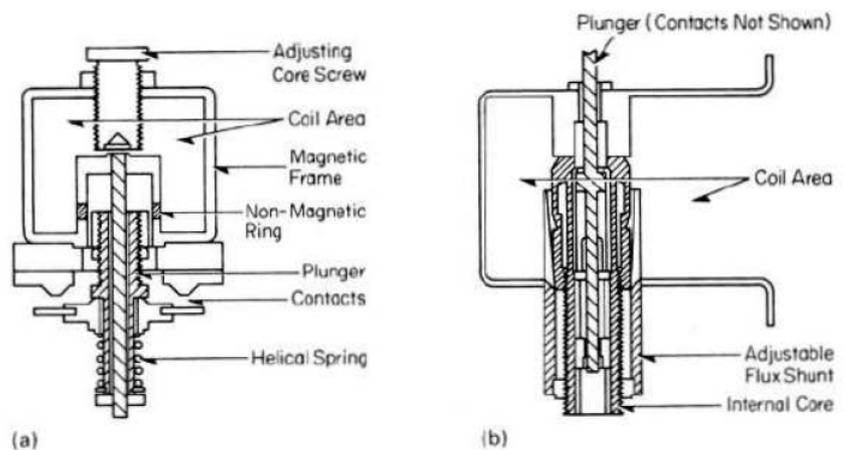
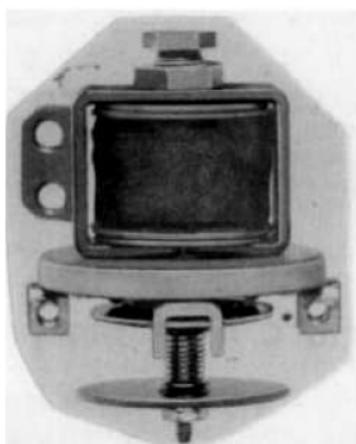


Figura 3.2: relé de atração tipo axial

### 3.1.3 Relés de Atração – Armadura em Charneira

O relé de atração – armadura em Charneira consiste de uma armadura magnética móvel em torno de um eixo colocado na sua aresta inferior, fechando um circuito magnético que será estabelecido pela passagem de corrente na bobina colocada em oposição à armadura. Quando a armadura é atraída, carrega consigo um contato que irá ao encontro de outro que é fixo e localizado na estrutura onde se encontra a bobina.

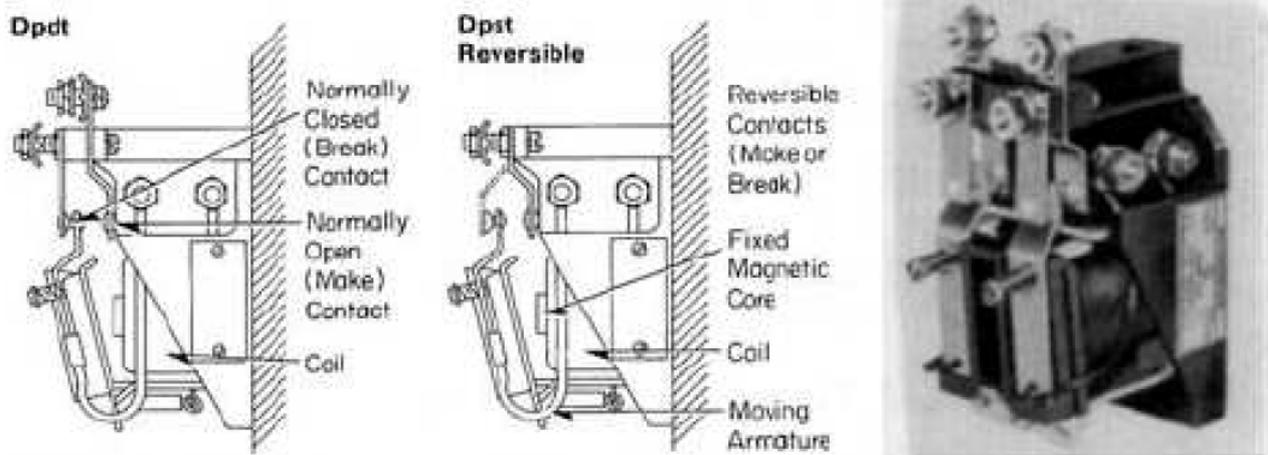


Figura 3.4: relé de atração tipo charneira

### 3.1.4 Relé de Indução – Disco de Indução

O relé de Indução – Disco de Indução consiste de um disco condutor, geralmente de alumínio, que se movimenta por indução em torno de um eixo no entreferro de um núcleo magnético pela passagem de corrente na bobina que o envolve. O fluxo produzido no entreferro é dividido em duas componentes, defasadas pela colocação de anéis de cobre que envolvem parte de cada face do pólo no entreferro. Fixado ao mesmo eixo move-se um contato em direção a outro, fixo na estrutura do relé.

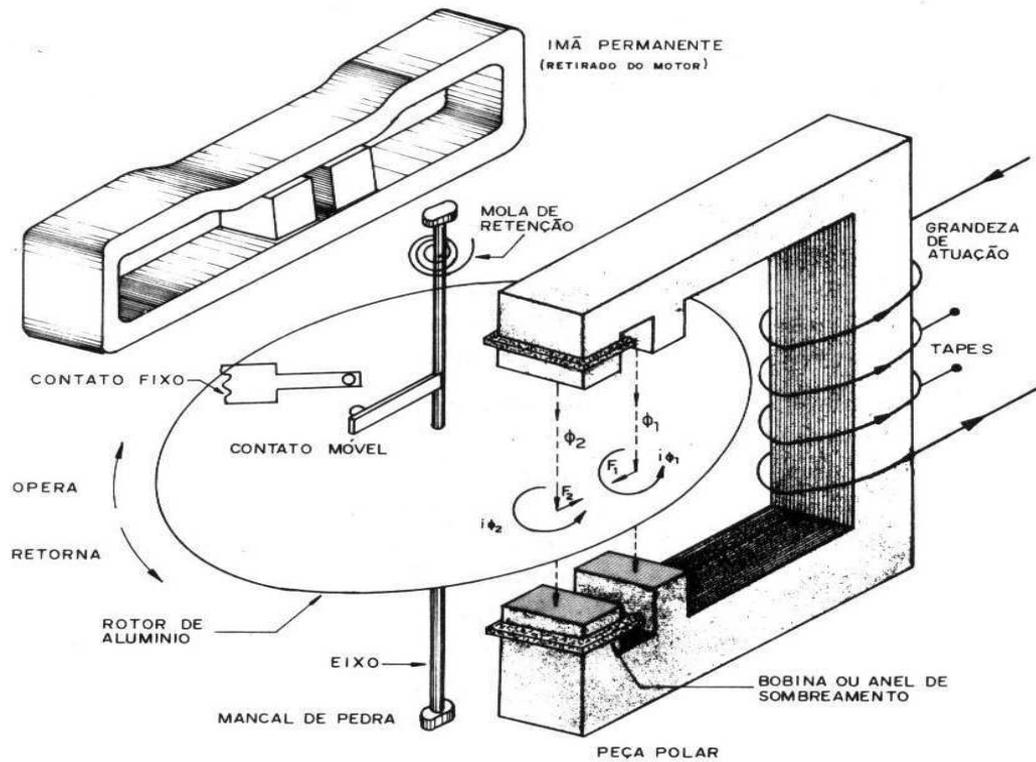


Figura 3.5: relé tipo disco de indução

### 3.1.5 Relé de Indução – Tambor de Indução

O Relé de Indução – Tambor de Indução consiste de um cilindro metálico com uma das bases fechadas como um copo, livre para girar no interior do entreferro anular compreendido entre as faces dos pólos magnéticos e do núcleo de ferro. São utilizados quatro ou oito pólos dispostos simetricamente, com duas fontes de polarização alimentando alternadamente as bobinas montadas nos pólos.

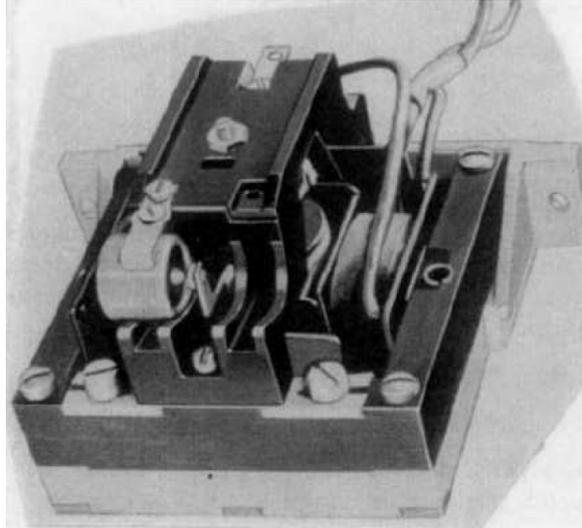


Figura 3.6: Relé tipo tambor

### 3.1.6 Relé de D`Arsonval

Este tipo de unidade é constituído por uma estrutura magnética e um ímã permanente interno, formando um núcleo cilíndrico com dois pólos. Uma bobina móvel livre para girar em um *gap* para criar um torque de rotação. Esta unidade opera com pouca energia em sua estrada, como a que é fornecida por shunts em corrente contínua por exemplo.

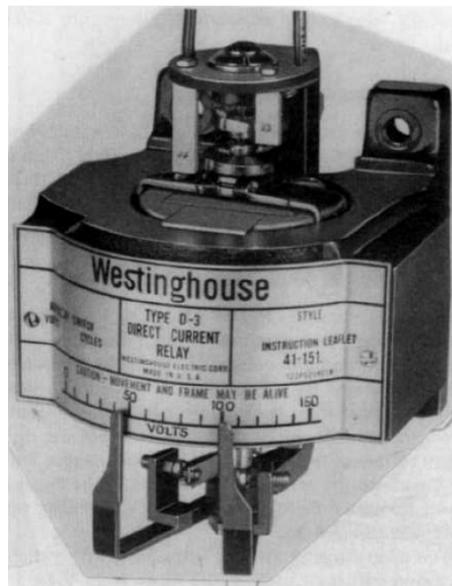


Figura 3.7: relé tipo D`Arsonval

### 3.1.7 Vantagens e Desvantagens dos Relés Eletromecânicos

Uma proteção eletromecânica possui algumas características vantajosas, tais como:

- **Durabilidade e robustez** – com a devida manutenção, pode-se conseguir elevada vida útil.
- **Tolerância a altas temperaturas** – não representa fator crítico para o adequado funcionamento do mesmo.
- **Baixa sensibilidade a surtos eletromagnéticos** – É necessário que a energia associada a esse tipo de fenômeno seja relativamente alta para algum dano.
- **Confiabilidade** – em relação a sua atuação para as condições especificadas.

Algumas das desvantagens desse tipo de proteção são:

- **Custo da instalação** - uso de maior espaço físico e maior o custo do relé.
- **Precisão** – quão maior a exigência por precisão maior o custo do relé.
- **Manutenção** – exige mão de obra experiente e específica, além de haver dificuldade em encontrar peças de reposição.
- **Limitação de funcionamento** – não é possível implementar características acessórias adequadas para enfrentar a crescente complexidade do Sistema elétrico de Potência, como por exemplo oscilografia.

### 3.2 Relé estático

A evolução do SEP, sob o ponto de vista da complexidade das interligações, aumento dos níveis de curto-circuito e demanda por melhor desempenho, motivou a pesquisa pela melhoria na concepção dos relés de proteção, com foco em sua velocidade de atuação, seletividade, estabilidade e sofisticação de suas características gerais. Na década de 1960, começaram as experimentações em relação à construção de relés de proteção baseados em componentes eletrônicos, sendo que na década de 1970 sua utilização tornou-se intensa. O termo estático surge da comparação com os relés eletromecânicos que possuíam partes móveis, sendo o relé estático

caracterizado pela ausência de elementos mecânicos móveis. No âmbito de utilização os relés estáticos são aplicados de igual maneira a composição de um Sistema de Proteção como os eletromecânicos, na figura 3.8 vemos um diagrama de bloco genérico de relé estático.

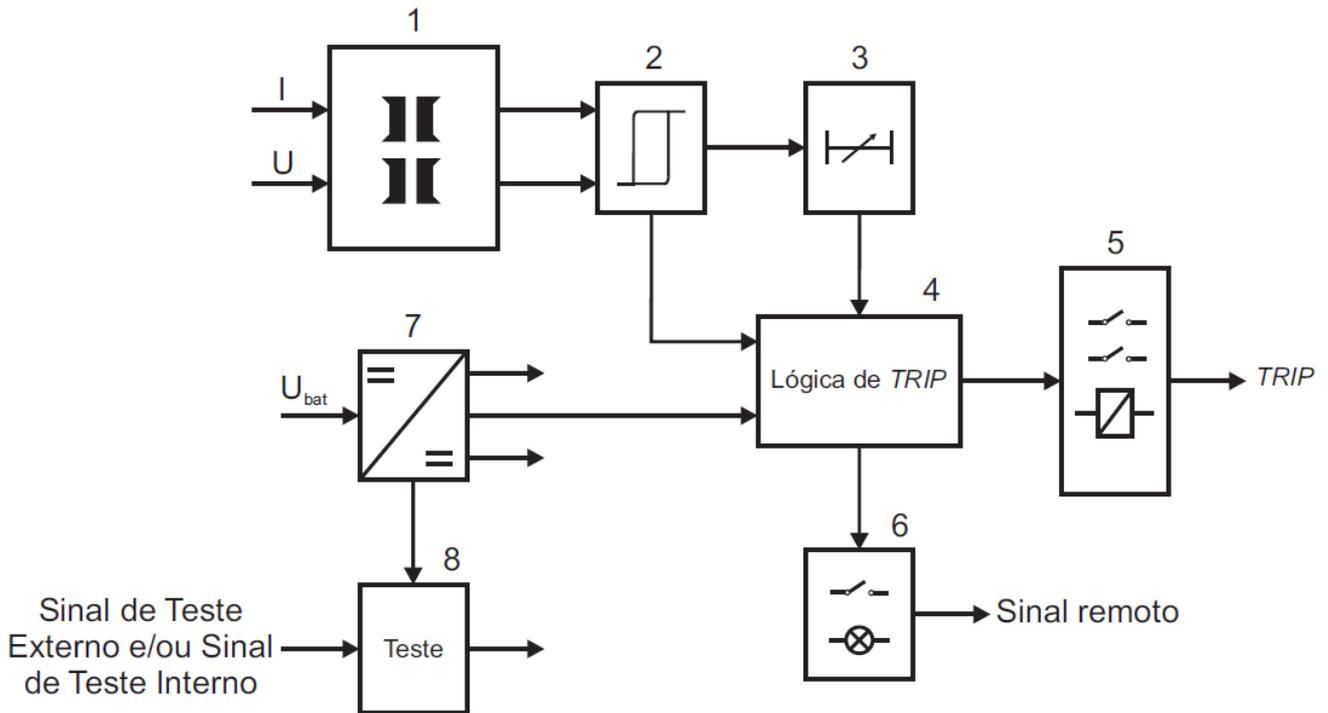


Figura 3.8: diagrama de blocos para um relé estático genérico.

As variáveis de entrada ( $I$ ) e/ou ( $U$ ) são encaminhadas para o bloco 1, que é responsável por ajustar os sinais de entrada a valores compatíveis para serem utilizados pelos circuitos eletrônicos posteriores. Fornece ainda isolamento galvânica entre os circuitos subsequentes e o SEP. Os valores de saída provenientes do bloco 1 são comparados com valores de referência no bloco 2, o qual terá seu limiar de operação ativado se os valores de referência forem ultrapassados, sendo que a saída gerada irá iniciar o bloco temporizador (3). O bloco lógico (4) examina se o valor proveniente da saída do bloco 2 continua ativo após o tempo ajustado para bloco (3) ter expirado. Caso isso ocorra, o bloco (5) de Trip 5 será ativado, além do bloco (6) de sinalização. O bloco (7) fornece a alimentação auxiliar para o relé estático. Já o bloco (8) é empregado em rotinas de teste da proteção utilizando para esse fim informações de origem interna ou externa ao equipamento.

### 3.2.1 Vantagens e Desvantagens dos Relés Estáticos

Uma proteção estática possui algumas características vantajosas, podendo-se citar:

- **Maior velocidade** - consequência direta da ausência de partes mecânicas móveis.
- **Baixo consumo** - representam uma carga menor para os TCs.
- **Facilidade de manutenção** - tornou-se mais simples e direta.
- **Confiabilidade** - obtida em função da construção modular.

Algumas desvantagens desse tipo de proteção são:

- **Maior sensibilidade a surtos** - componentes eletrônicos são danificados com quantidades menores de energia associada a um surto se comparados com os relés eletromecânicos.
- **Envelhecimento** - possuem alguns elementos constituintes com vida útil reduzida, como os capacitores eletrolíticos por exemplo.
- **Influência do meio ambiente** - a temperatura e a umidade passam a ser fatores de influência sobre o funcionamento desses equipamentos, devido a tolerância dos mesmos a esse fatores.



Figura 3.9: relé estático para proteções diferenciais em torno de transformadores e barramentos.

# CAPÍTULO 4

## RELÉ DIGITAL

### 4.1 Relé Digital

Os relés digitais tiveram início na década de 60 assim que os computadores começaram a substituir as ferramentas de análise de áreas de potência, como cálculo de curto-circuito, fluxo de carga e estabilidade, foram os primeiros programas computacionais a serem implementados em Sistema Elétrico de Potência. A aplicação desta tecnologia em relés de proteção seria o próximo passo promissor. Entretanto, essa aplicação era economicamente inviável e os computadores da época não suportavam a alta velocidade exigida pelas funções de proteção. Mesmo assim, a curiosidade acadêmica na investigação de algoritmos aplicados a tais funções foi aguçada em vários pesquisadores. A evolução dos computadores viabilizou técnicas e economicamente a implantação dos relés digitais nos anos posteriores.

Atualmente, os projetos de novas subestações de energia elétrica fazem uso exclusivamente da tecnologia dos relés de proteção digitais. Os relés de proteção eletromecânicos e de estados sólidos, instalados em subestações antigas, vêm também, gradativamente, sendo substituídos por modernos relés digitais. A década de 70 foi, então, uma era em que os computadores começaram a contribuir para aspectos de monitoramento em tempo real e controle dos SEPs, bem como abriu caminho a implementação, em anos mais recentes, de relés inteligentes conectados a uma eficiente rede de comunicação de dados, contribuindo assim para uma revolução na proteção de SEPs .

### 4.2 O desenvolvimento dos Relés Digitais

O relé digital explorava a idéia de que a proteção de vários equipamentos em uma subestação de energia deveria ser manipulada por um único computador. Isto certamente era motivado pelo fato dos computadores serem muitos onerosos na década de 60 e, portanto, a idéia do uso de múltiplos

computadores para esta finalidade não era adequada. Adicionalmente, a velocidade de tais computadores era muito lenta para a função de proteção e o seu consumo de potencia muito alto.

Na época de 60, abordando também o desenvolvimento de algoritmos para a proteção de distância de linhas de transmissão de alta tensão. Deve ser enfatizado que a proteção das linhas de transmissão sempre atraiu maior atenção dos pesquisadores da época pelo uso indiscriminado nos sistemas elétricos, alto custo e complexidade de funcionamento. Outros desenvolvimentos que ocorreram, aproximadamente na mesma época, levaram em consideração a natureza não senoidal das formas de ondas faltosas de tensão e corrente. Estas investigações concentraram seus esforços na extração dos componentes fundamentais de ondas ruidosas baseadas no método de *Fourier* de um ciclo. A redução da janela de dados para meio ciclo, bem como o uso de outros métodos tais como a função *Walsh* ou o filtro *Kalman* também foram propostos em anos posteriores.

Avanços significativos no *hardware* computacional ocorreram no início da década de 70. O tamanho do consumo de potência e custo dos computadores diminuiu drasticamente, enquanto simultaneamente a velocidade de processamento mais do que dobrou. Isto foi decisivo na real implementação de dispositivos digitais na proteção de sistemas, bem como na localização de faltas em linhas.

Atualmente, com a desregulamentação da indústria de potência em nível mundial, os sistemas de potência se tornaram ainda mais complexos e sua configuração e fluxo de potência bastante mutável dinamicamente. Dentro deste contexto, está mais difícil para os relés de proteção, mesmo com a tecnologia digital, a identificação precisa das situações de falta. Para enfrentar este cenário, conceitos de proteção adaptativa, a qual ajusta funções automaticamente de acordo com determinadas condições do sistema de potência. A proteção adaptativa é uma técnica que permite a modelagem da área de proteção mediante mudanças nas condições do sistema, visando manter o melhor desempenho da mesma. Deve ainda ser enfatizado o grande papel que as redes de comunicações do tipo Intranet, associadas aos relés inteligentes, podem exercer na melhoria de tais condições e sua contribuição para o desenvolvimento da proteção dos sistemas elétricos.



Figura 4.1: painel de controle de subestação com relés digitais modelo SEL-351S

### 4.3 Arquitetura do relé digital

Os relés digitais consistem de sub-sistema com funções bem definidas, como pode ser visto na figura 4.2, onde mostra os principais sub-sistemas de relé digital.

- Os transformadores de entrada (módulo de interface) módulo de interface atenuam as tensões e correntes de entradas a níveis de tensão adequados aos microprocessadores ( $\pm 10V$ ). Permitem também a isolação galvânica entre os relés de proteção e os sinais provenientes dos transformadores de corrente (TCs) e transformadores de Potencial (TPs).
- Filtros analógicos passivos passa-baixa são também usados nos módulos de interface (filtros *anti-aliasing*), com o objetivo de se evitar erros no processamento digital dos sinais.

- Dispositivos Sample and Hold (S/H) amostra as entradas analógicas em um mesmo instante e disponibiliza os sinais ao multiplexador (MPX). Este dispositivo minimiza a deformação provocada pela amostragem não sequencial e consequente operação incorreta da proteção.
- O MPX permite que seja usado apenas um conversor A/D ( Analógico Digital) para várias entradas analógicas. As entradas analógicas são conectadas uma a uma pelo multiplexador ao conversor A/D como visto na figura 4.3.
- No conversor A/D os sinais analógicos são convertidos para a forma digital em intervalos definidos pela taxa amostral.
- O módulo de entrada lógica informa ao processador sobre o estado de chaves, disjuntores, seccionadores e sobre a atuação de outras proteções.
- O processador controla o funcionamento do relé, faz a filtragem digital dos sinais para extração dos componentes fundamentais, se pertinente, executa os cálculos e decide atuação. O software lógico do relé será armazenado em memória ROM, enquanto a memória RAM será utilizada para armazenar quantidades e operações intermediárias no algoritmo do relé. Os ajustes do relé serão armazenados em E2PROM.
- O módulo de saída lógica é responsável pelas atuações de disjuntores e alarmes decididos pelo processamento.
- O suprimento de energia é geralmente fornecido por baterias.

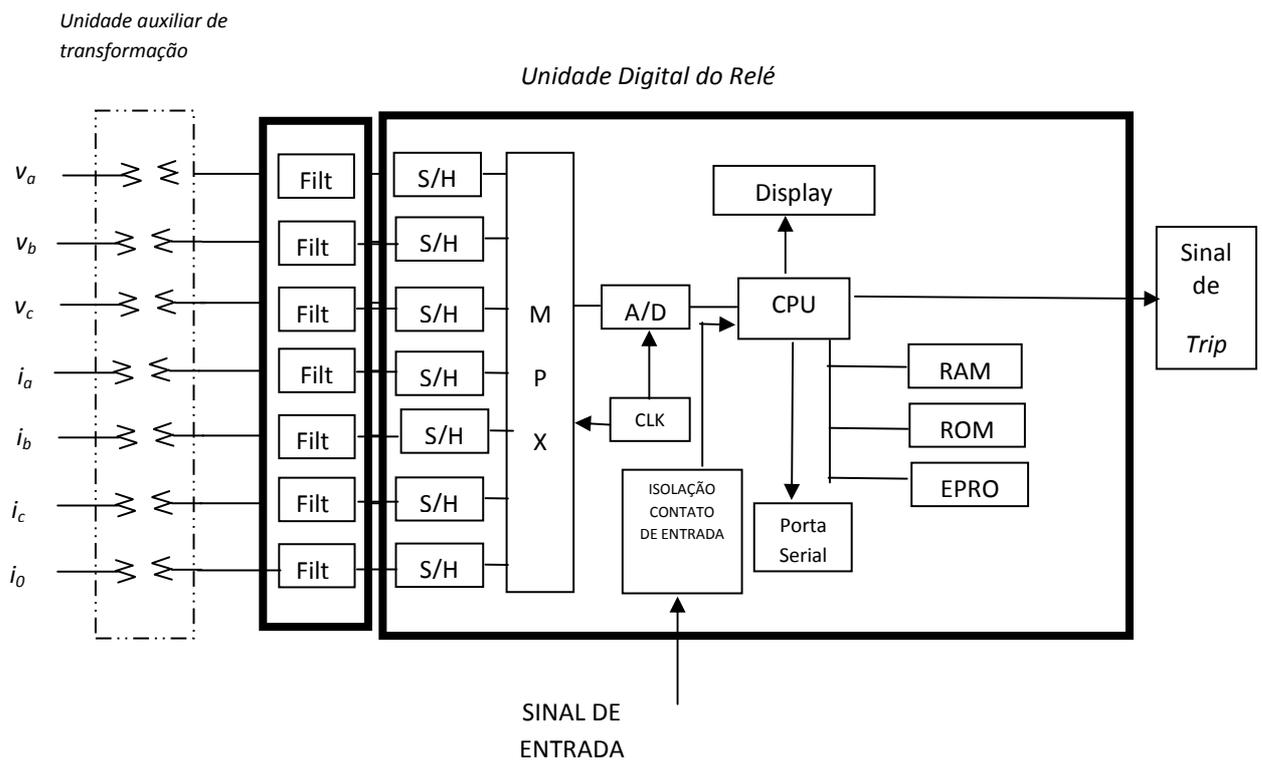


Figura 4.2: arquitetura do Relé digital

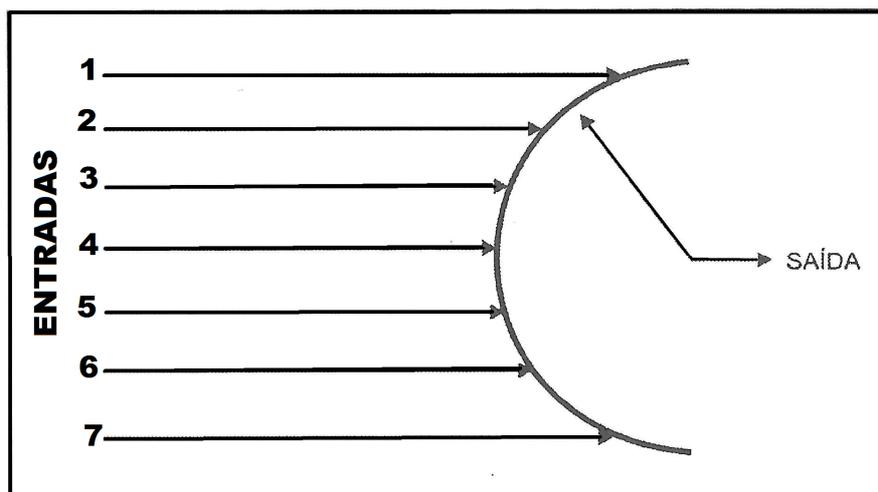


Figura 4.3: princípio de operação de um multiplexador

#### 4.4 Conversor analógico digital A/D

O conversor A/D, compara o valor do sinal analógico que, normalmente varia continuamente numa faixa, com valores de referência para obter um valor digital. Este valor, codificado na forma de um número binário de  $r$  dígitos, é então armazenado em um registrador X, conforme indicado na figura 4.4.

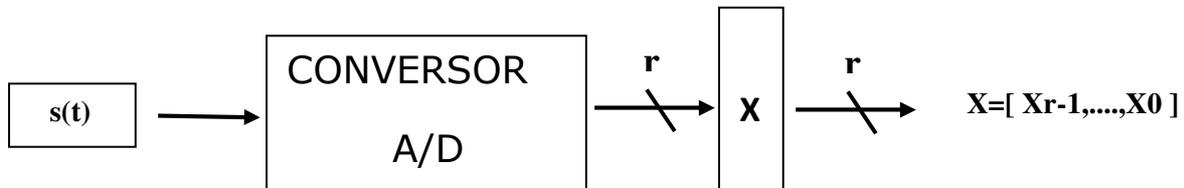


Figura 4.4: princípio do conversor A/D.

Em muitas aplicações é desejado ler o valor do sinal com certa frequência. Este processo é denominado de amostragem e o resultado consiste em uma série de valores da entrada. A conversão ocorre para cada um destes valores e só muda no instante da próxima amostragem.

Assim o valor do sinal analógico em um dado instante de tempo  $t_i$ , é capturado e a amplitude  $s(t_i)$  é convertida para digital, conforme indicado pelo gráfico da figura 4.5. Este resultado, é então codificado na forma de um número binário de  $r$  dígitos e armazenado no registrador X como visto na figura 4.4.

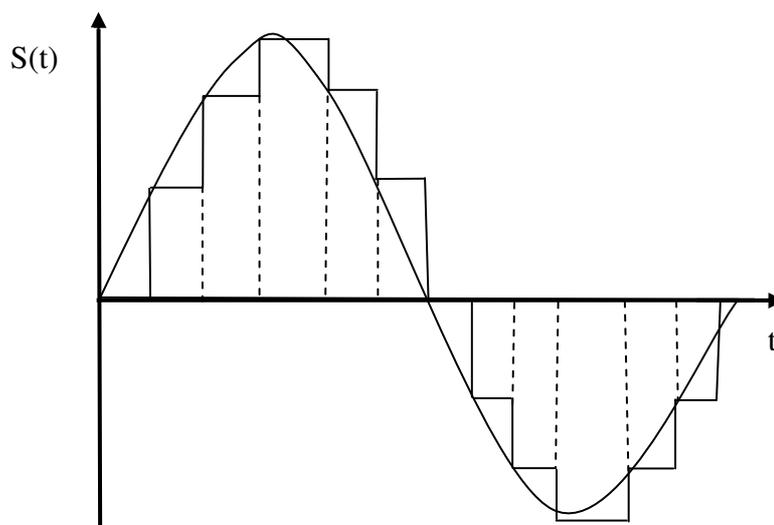


Figura 4.5: amostragem de um sinal

## 4.5 Filtro *Anti-Aliasing*

O teorema de amostragem informa que para uma determinada frequência  $f_l$  do sinal analógico possa ser completamente reconstituída, a taxa amostral no processo de digitalização deve ser no mínimo igual a  $2 \times f_l$ , onde  $f_l$  é conhecida como Frequência de *Nyquist*.

O teorema da amostragem define a mínima taxa amostral para que a sobreposição de espectros, ou *aliasing*, seja evitada. A figura 4.7 ilustra o fenômeno em si, onde duas ondas são representadas através da mesma taxa amostral. Considerando a frequência amostral adotada como  $f_a$ , a forma de onda representa no item (a) possui uma frequência de  $10/9 f_a$ , enquanto frequência da forma de onda representada em (b) é de  $1/4 f_a$ . Pode ser notado que a forma de onda referente ao item (a) não cumpre o teorema da amostragem e, portanto, uma má representação do sinal fica evidenciada.

Assim, para que não ocorra tal fenômeno, filtros *anti-aliasing* devem ser usados no processo de digitalização do sinal. Filtros passa-baixa com frequência de corte igual a metade da taxa amostral utilizada pelos conversores analógicos digitais devem ser utilizados. A resposta em frequência do filtro *anti-aliasing* ideal com frequência de corte  $f_c$  é mostrada na figura 4.6. Em geral um filtro com tal característica não pode ser encontrado na prática. Filtros com uma frequência de corte muito abrupta produziram grandes defasagens no tempo referentes a sua resposta à função degrau. Em aplicações práticas, os Filtros *Butterworth* e *Chebyshev*, de segunda ordem, satisfazem os requisitos dos relés digitais e suas respostas em frequências são ilustradas na figura 4.8.

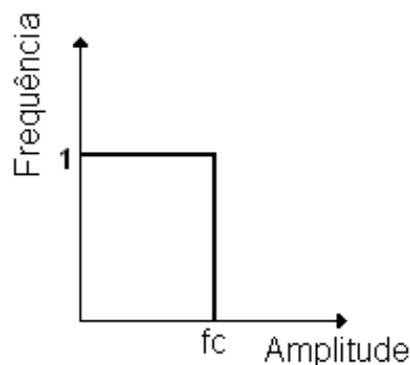


Figura 4.6: resposta em frequência do filtro passa-baixa ideal

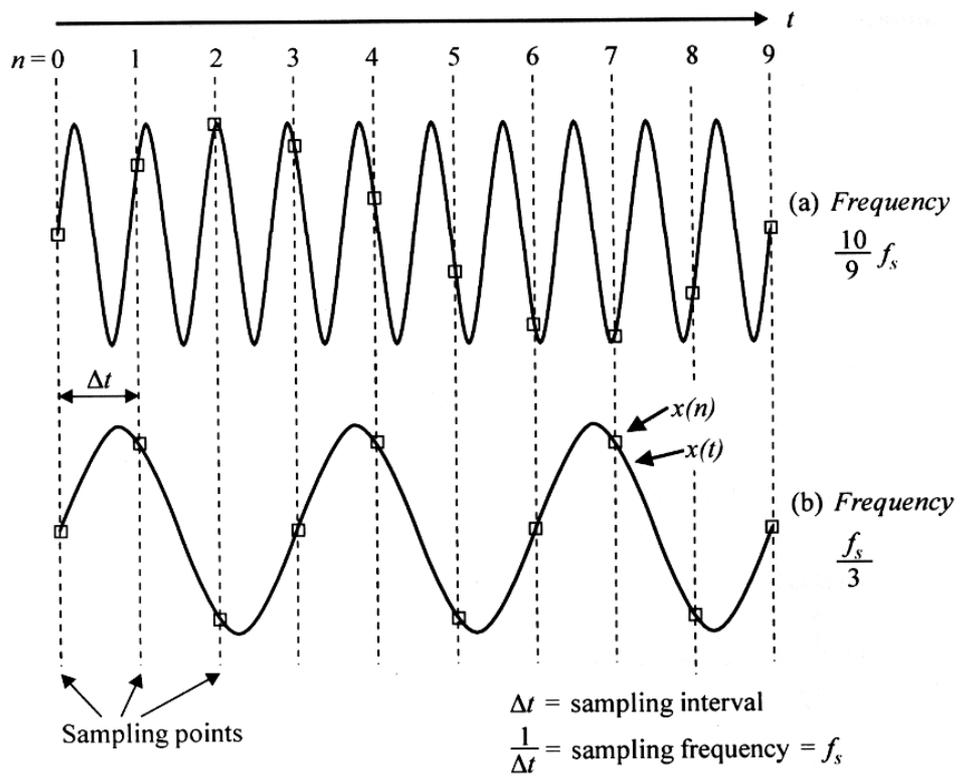


Figura 4.7: representação do fenômeno de sobreposição de espectros

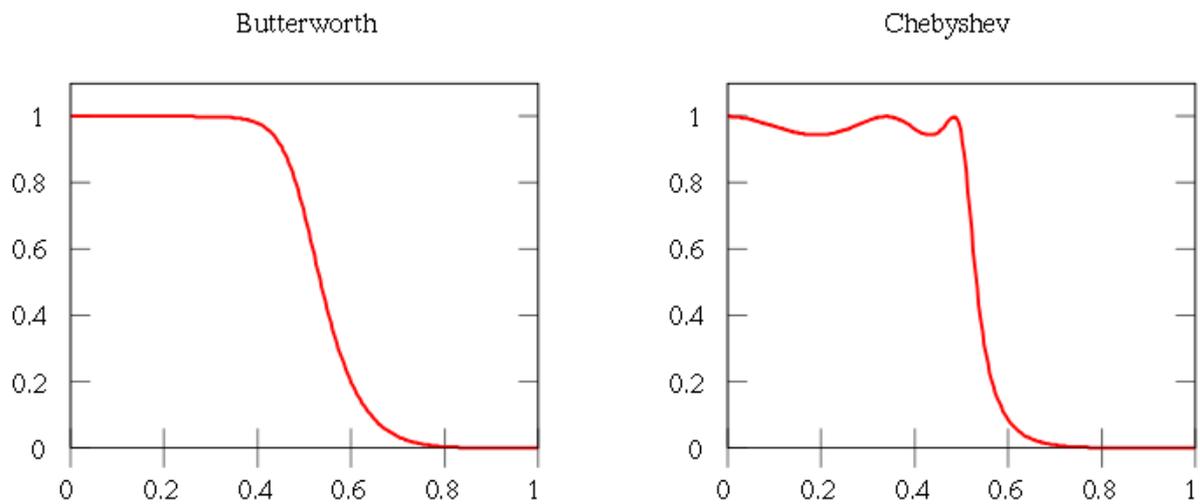


Figura 4.8: resposta em frequência dos filtros butterworth e chebyshev.

## 4.6 Benefícios da Proteção Digital

Os relés digitais têm inúmeras vantagens na proteção do sistema elétrico de potência dentre essas vantagens podemos destacar:

- **Custo:** No início, o custo dos relés digitais era equivalente a de 10 a 20 vezes o custo dos relés convencionais de estado sólidos. O custo dos relés digitais foi drasticamente reduzido ao longo dos anos e sua velocidade de processamento aumentou substancialmente. Hoje, as novas subestações fazem uso indiscriminado da tecnologia digital.
- **Confiabilidade e Auto-diagnose:** O relé digital pode ser programado para monitorar constantemente seus sistemas de *hardware* e *software*, detectando assim qualquer defeito interno que possa existir. Na ocorrência de um defeito, o relé pode se colocar fora de serviço e/ou gerar um alarme ao sistema central. Esta característica é um dos mais importantes argumentos técnicos a favor desses relés.
- **Integração Digital:** os microprocessadores e a tecnologia digital têm se tornado a base da maioria dos sistemas empregados nas subestações. Medições, comunicações de dados, telemetria e controle são praticamente realizados fazendo-se uso da tecnologia digital. Nas subestações modernas, os relés digitais devem está integrados naturalmente nesses sistemas. Deve ainda ser enfatizado o crescimento da disponibilidade de comunicação via fibra óptica com a crescente utilização dos cabos OPGW (*Optical Ground Wire*) pelas companhias de energia.
- **Flexibilidade Funcional:** O relé digital pode ser programado para executar diversas funções. Desta forma ele também pode executar muitas outras tarefas na subestação tais como: medição, monitoramento, controle, localização de faltas, etc.. Este relé pode ainda, como citado, possuir característica adaptativa, modificando sua atuação em várias funções, para torná-las, mais adequada às condições dos SEPs.
- **Possibilidades de Implementação de Técnicas Inteligentes:** a tecnologia digital abre portas para a implementação de ferramentas inteligentes para um melhor desempenho da proteção de sistema elétricos. Redes neurais Artificiais, Lógica Fuzzy, Agentes, Algoritmos Genéticos são algumas destas ferramentas que podem contribuir para tal finalidade, antes inimaginável considerando os relés convencionais.

Alguns problemas relativos à adaptação da nova tecnologia, tais como mudanças no hardware, linguagem computacional, ambiente hostil para o equipamento, etc., estão hoje tecnicamente resolvidos.

# CAPÍTULO 5

## RELÉ SEL-351A DA SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES (SEL)

Nesse capítulo vamos abordar a funcionalidade e a característica do relé multifunção, tipo SEL 351A, para proteção de alimentadores, linhas de transmissão, transformadores, capacitores, reatores, geradores e interligação concessionária de consumidor com ou sem co-geração. O estudo desse Relé foi motivado pelo fácil acesso e maior aceitação sem fazer apologia a marca ou a modelo.



Figura 5.1: do relé com Botões dedicadas para comando seguro de fechamento e abertura do disjuntor.



Figura 5.2: sem botoeiras

## 5.1 Funções de Proteção

Como já dito no capítulo anterior, o relé digital tem várias funções de proteção e pode ser programado de acordo com suas finalidades de proteção, o relé SEL 351A tem como suas principais funções de proteção Na Figura 5.3 e mostra os números de dispositivos associados com a proteção e controle disponíveis no Sistema de proteção SEL-351A, juntamente com uma lista de controles padrão e os recursos opcionais de comunicação

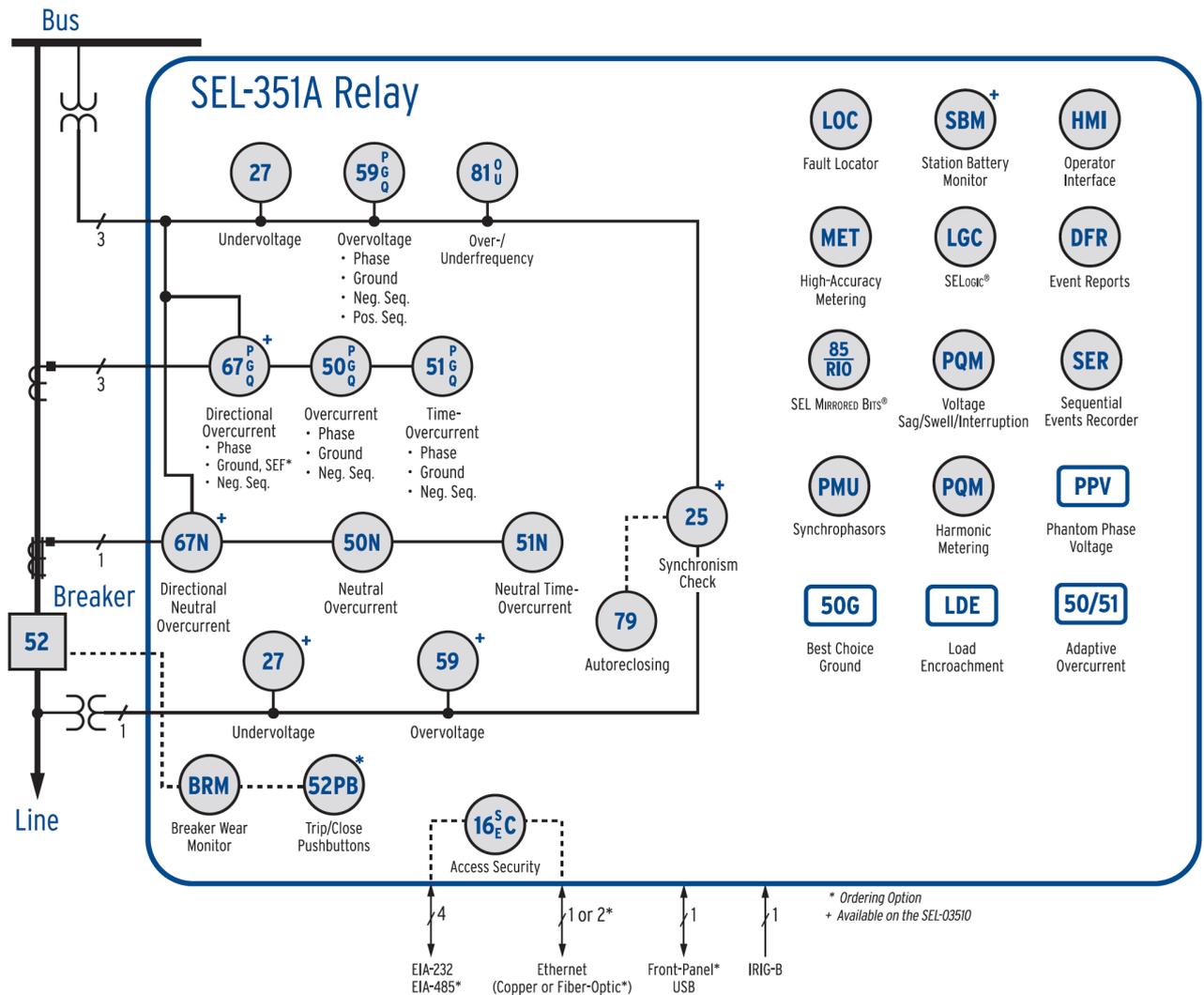


Figura 5.3: Diagrama funcional do Relé SEL351A

- 50/51 - Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51G - Sobrecorrente residual instantânea e temporizada;
- 50/51N – Sobrecorrente instantânea e temporizada de neutro;
- 50/51Q (46) - Sobrecorrente instantânea e temporizada de seqüência negativa;
- 67/67G/67Q – Sobrecorrente direcional de fase, residual e de seqüência negativa;
- 67N - Sobrecorrente direcional de neutro;
- 25 - Verificação de sincronismo;
- 79 – Religamento automático, até quatro tentativas;
- 27/59 - Subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;
- 59G - Sobretensão residual;
- 59Q (47) - Sobretensão de seqüência negativa;
- 50/62BF - Falha de disjuntor;
- 60 - Perda de potencial;
- 81 – Sub / Sobrefreqüência e taxa de variação de freqüência;
- 51/67HZ – Sobrecorrente direcional de neutro de alta sensibilidade (**opcional**);

## 5.2 Algumas aplicações

O sistema de proteção SEL-351A tem muitas aplicações de proteção como monitoramento e controle. A Figura 5.4 mostra alguns tipos de proteções adaptados para proteção com o SEL-351A. O SEL-351A pode ser usado para proteger virtualmente qualquer sistema ou dispositivo, incluindo linhas de transmissão, alimentadores, transformadores, bancos de capacitores, reatores e geradores entre outros. Na figura 5.4, tem algumas aplicações de sua Proteção no Sistema Elétrico de Potência.

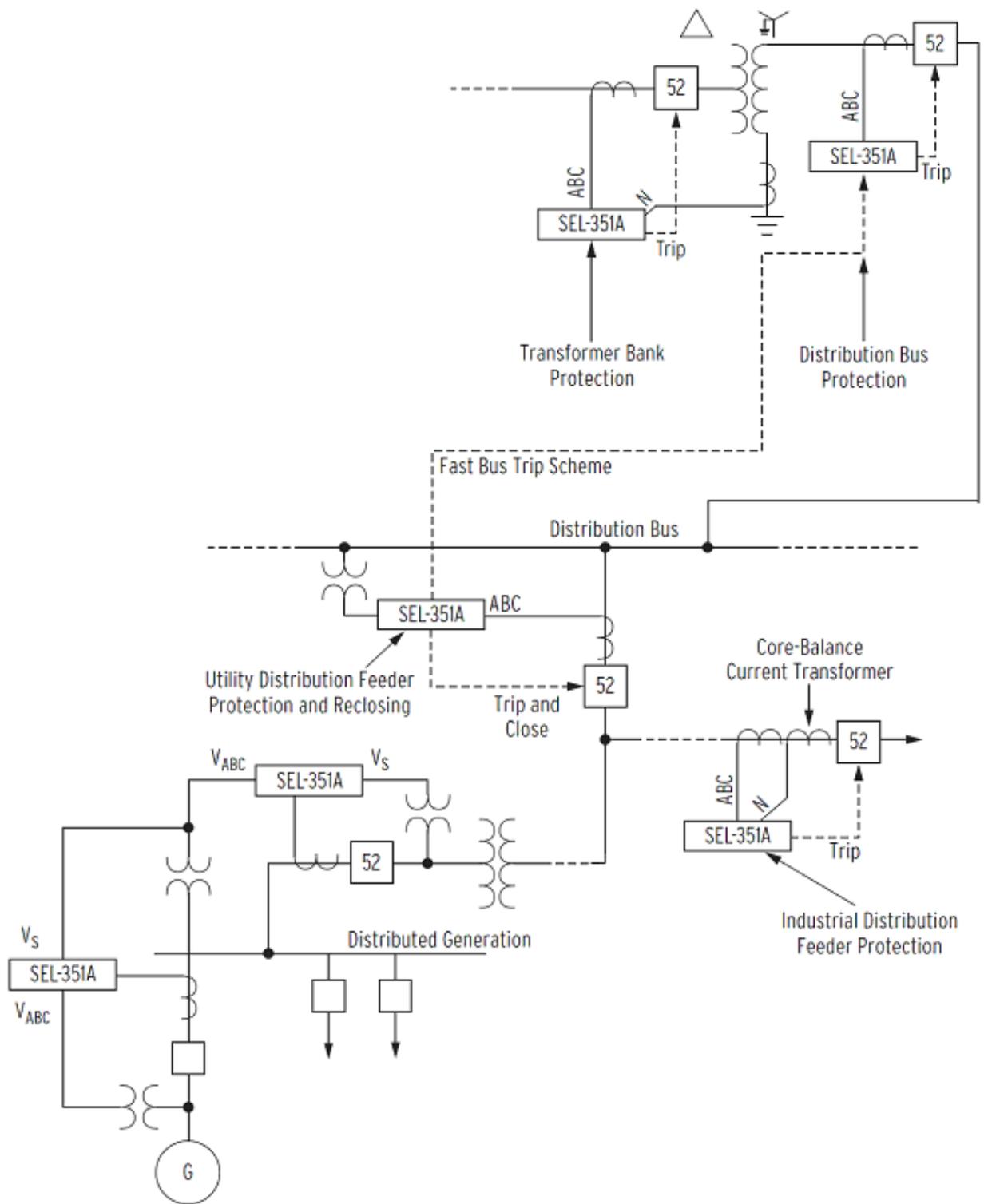


Figura 5.5: Aplicação do sistema de proteção do Relé em todo sistema de potência.

### 5.3 Software



Figura 5.6: tela de iniciação do software ACSELERATOR QuickSet.

O software ACSELERATOR QuickSet usa sistema operacional Microsoft ® Windows ® para simplificar as configurações e prestar apoio de análise para o SEL-351A, o ACSELERATOR QuickSet cria e gerencia a configuração do relé como:

- Desenvolve configurações off-line com o inteligente Set-Tring editor que permite apenas configurações válidas para o relé.
- O SELOGIC cria equações de controle apenas arrastando e colando os comandos lógicos no editor gráfico e/ ou editor de texto.
- Utiliza ajuda online para configurações adequadas.
- Organiza as configurações do relé com o gerenciador database.
- Carrega e recupera configurações usando apenas um simples computador ligado a rede de comunicação.

O ACSELERATOR QuickSet pode ser usado para verificar as configurações e analisar os eventos:

- Usando o simulador para testar a configuração lógica com estímulo de entrada.
- Para análise do Sistema Elétrico de Potência integrando a forma de onda e instrumentos de análise dos harmônicos.

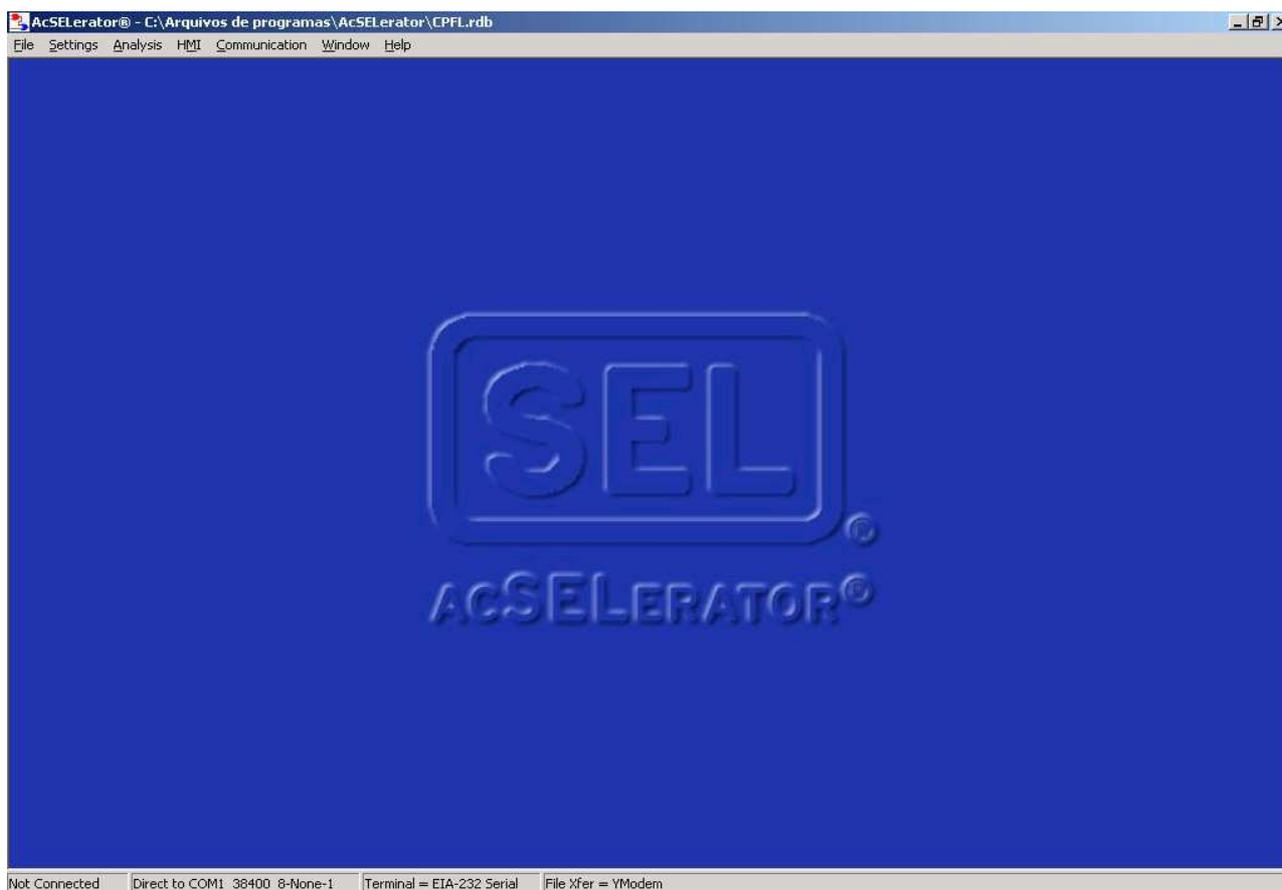


Figura 5.7: A Tela principal do ACSELERATOR QuickSet.

#### 5.4 A programação Lógica

O SELOGIC é utilizado para produzir equações de controle com o intuito de ativar e desativar o religamento, definir o início de religamento e condições de supervisão entre outras funções, com isso o usuário pode programar o relé para atuar a maneira que desejar, respeitando suas configurações básicas. O SELOGIC tem uma interface gráfica simples e bem detalhada de acordo com a figura 5.7, podemos notar que, para construir uma programação lógica, precisa apenas clicar nos ícones lógicos e arrastá-los para a tela e com isso conectar uns no outro de acordo com a propriedade que o programador queira adquirir.

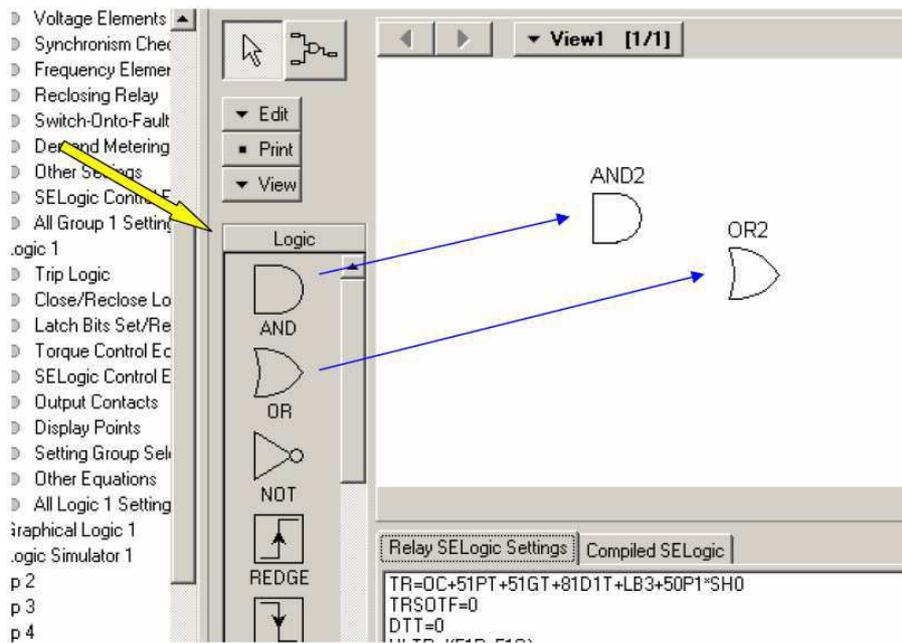


Figura 5.7: criando gráficos de lógica

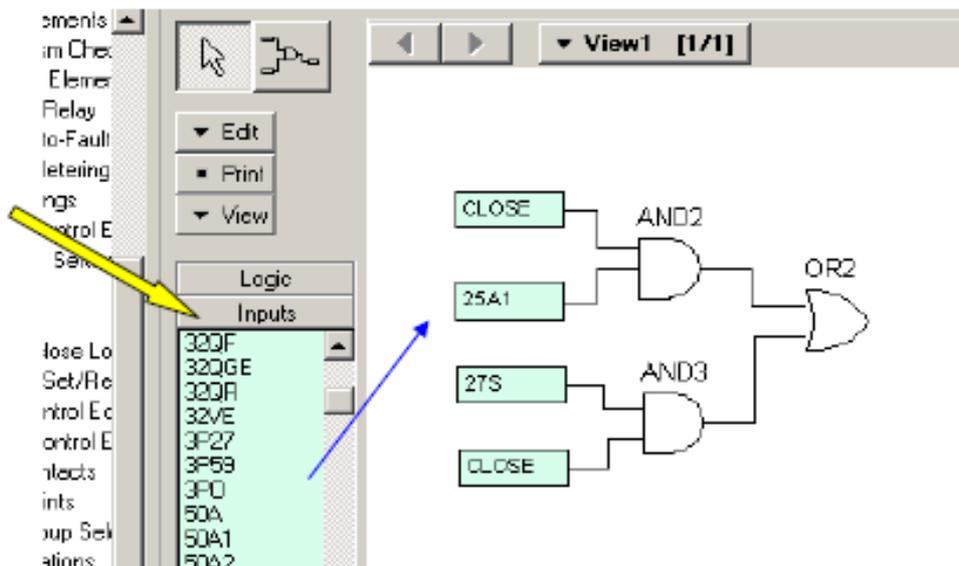


Figura 5.7: colocando as entradas lógicas disponíveis na opção inputs.

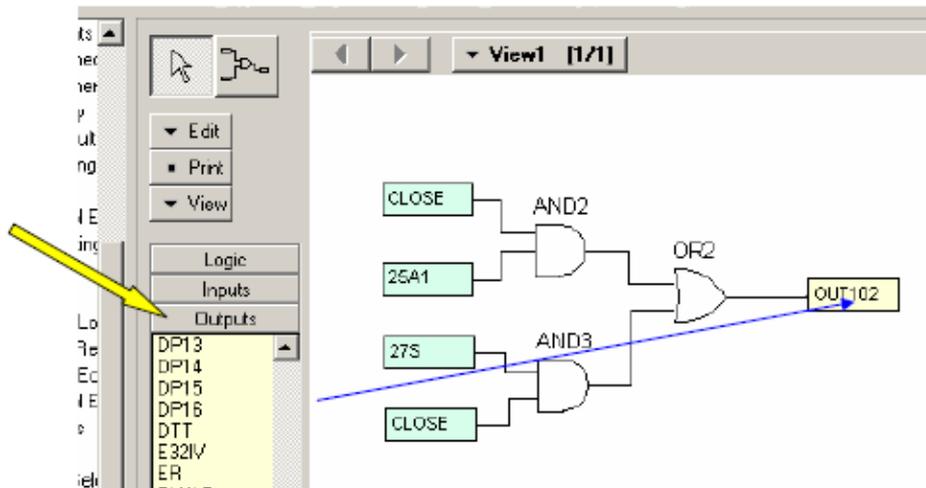


Figura 5.8 colocando saídas lógicas disponíveis na opção outputs.

## 5.5 Comunicação

O relé não requer comunicações especiais com o software. Pode usar qualquer sistema que emula um padrão do sistema de terminal. Estabelece comunicações por ligações dos computadores, modems, conversores de protocolo, concentradores de dados, switches porto, comunicação com processadores, e impressoras. Conectam múltiplos relés SEL-351A com um processador de comunicações e esse conectado a uma Ethernet que será ligada ao computador. A figura 5.10 demonstra uma conexão de vários relés com um processador de comunicações e ligado ao computador.

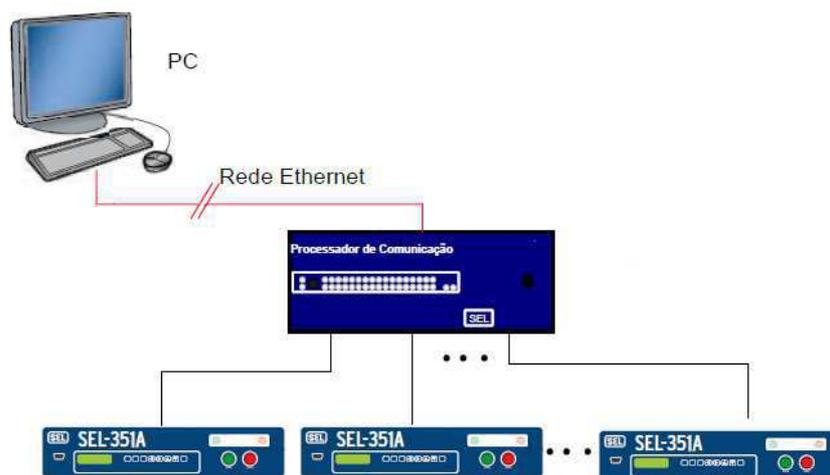


Figura 5.9: conjunto de relés ligado ao computador por meio de processador de comunicações.

## 5.6 AcSELeRator Analytic Assistant

Com o programa AcSELeRator Analytic Assistant, podemos visualizar as componentes de fases do sistema e sua oscilografia e com isso determinar qual foi o defeito ocorrido e que tipo de proteção o relé utilizou e ainda onde está localizado o defeito.

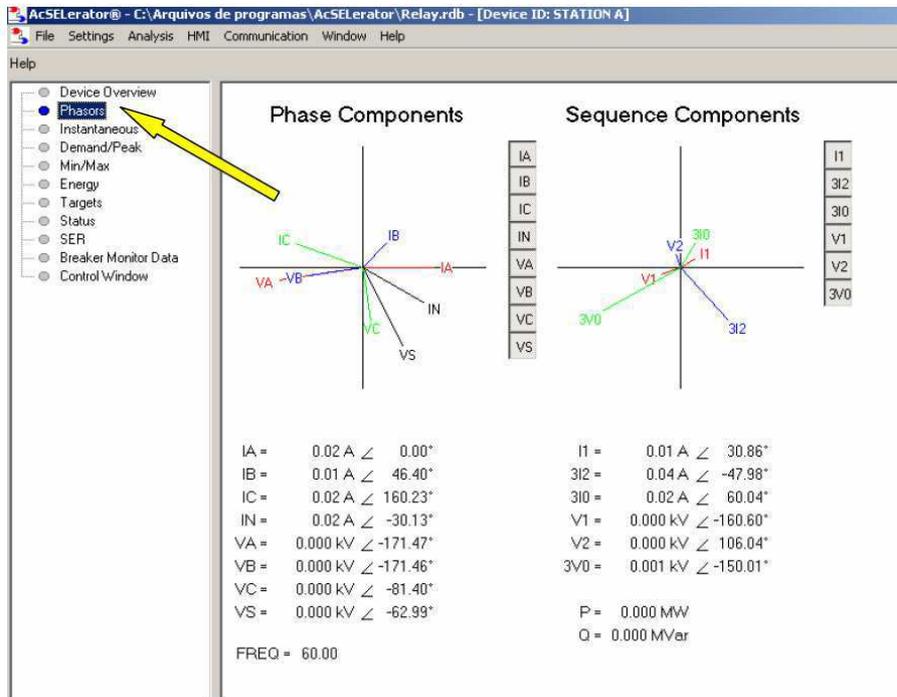
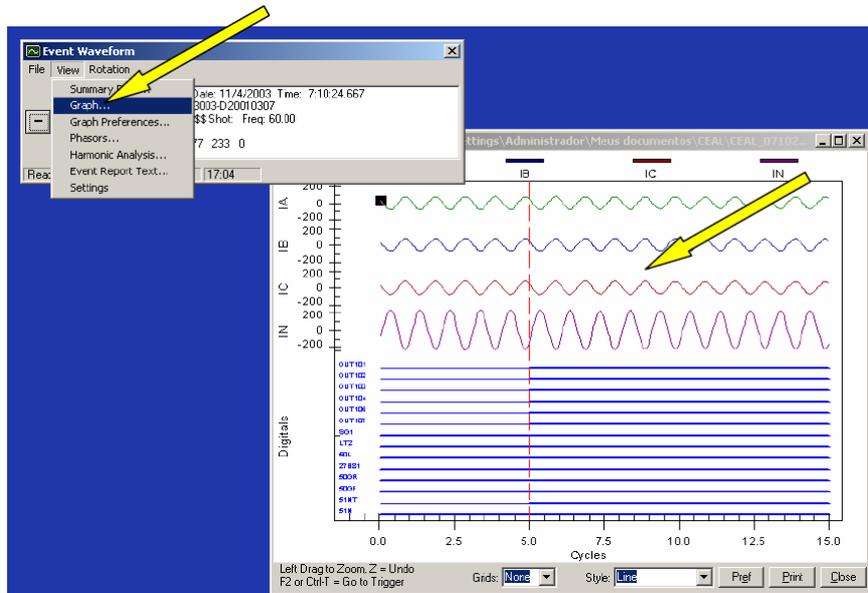


Figura 5.10: mostra as componentes de fases e seqüências de fases

- Gráficos que mostra as ondas senoidais e as variáveis digitais



Figuras 5.11: mostra o gráfico do sistema

- Fasores

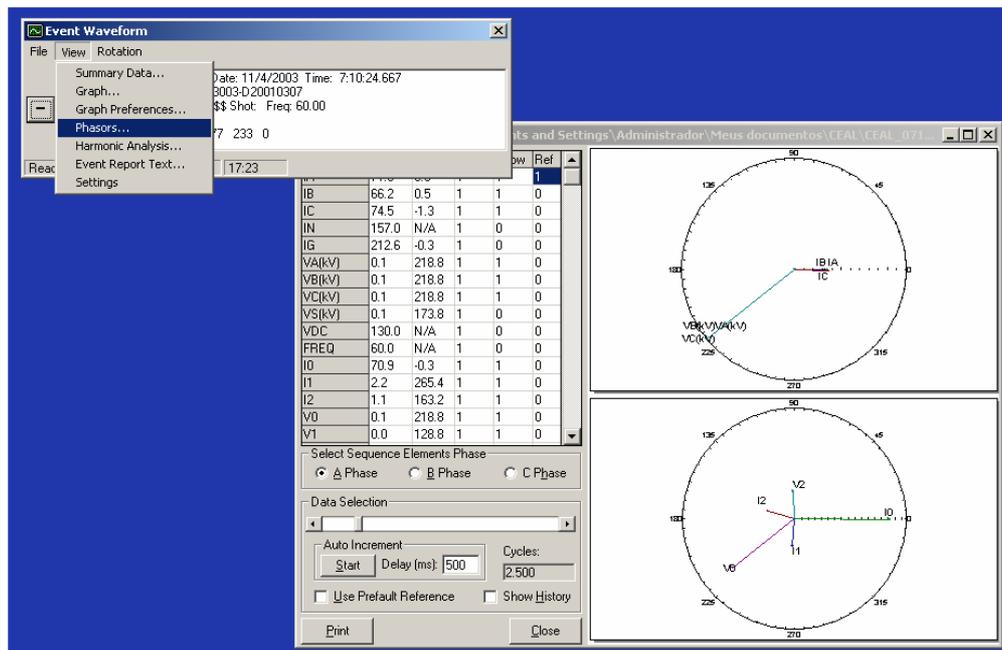


Figura 5.12: mostra os fasores analógicos e de seqüência

## 5.7 Funções de Medição

- Correntes de fase (IA, IB, IC), de neutro (IN) e residual (IG), correntes de seqüência (I1, 3I2, I0);
- Tensões de fase (VA, VB, VC) e de sincronismo (VS);
- Potência ativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Potência reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Fator de potência por fase e trifásico;
- THD e harmônicos individuais para tensões e correntes até a 16ª ordem;
- Demanda de corrente de fase, de neutro e de seqüência negativa;
- Demanda de potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Energia ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Freqüência;
- Registro de valores máximos e mínimos de grandezas analógicas;
- Medição sincronizada de fasores (IEEE C37.118).

## 5.8 Funções de Monitoramento

- Oscilografia, armazena até 11 segundos de dados;
- Seqüência de eventos, armazena os últimos 1024 eventos;
- Localizador de faltas (LDF), indicação em km ou %.

- Monitoramento do sistema de alimentação auxiliar CC (banco de baterias), fornecendo alarme para sub ou sobretensão;
- Monitoramento de desgaste dos contatos do disjuntor por pólo;
- Contador de operações;
- Monitoramento das bobinas do disjuntor (através de programação lógica);

## **5.9 Outras Características**

- Software amigável para parametrização (AcSELerator);
- Servidor Web;
- Contatos Standard: capacidade de condução contínua 6A, 50A por 1 segundo, capacidade de interrupção 0,3A (125Vcc, L/R = 40ms);
- Tensão auxiliar: 24/48 VCC ou VCA, 48/125 VCC ou VCA, 125/250 VCC ou VCA;
- Temperatura de operação  $-40^{\circ}$  a  $+85^{\circ}$  C.

## Considerações finais

Conforme mencionado ao longo do presente trabalho, os relés tiveram grandes mudanças no decorrer das décadas, essas mudanças visam sempre a proteção mais efetiva do Sistema Elétrico de Potência. Como já visto, os relés eletromecânicos apesar de serem robustos e possuírem uma vida útil, considerada longa, não tem precisão comparável aos relés digitais.

Os relés digitais em comparação com os demais relés têm inúmeras vantagens e maior confiabilidade, com isso, viabiliza o uso constante desses tipos de relés, levando a substituição dos relés estáticos e eletromecânicos por relés digitais.

Sabemos da importância de obter maior proteção dos sistemas elétricos de potência por dispositivos que proporcionem confiabilidade e rapidez, então, atualmente os relés digitais estão no topo dos aparelhos confiáveis que abrangem diversos tipos de proteções, buscando sempre a qualidade do fornecimento da energia elétrica.

## Referências bibliográficas

- [1] G. Kindermann, *Proteção de Sistema Elétrico de Potência*, 1st ed. Florianópolis: Edição do Autor, 1999, vol. 1.
- [2] Caminha, A. C., *Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos*, São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 1977.
- [3] C. A. S. Araújo, *et al*, *Proteção de Sistemas Elétricos*, 2nd ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência LTDA, 2005.
- [4] ABNT, *Normas Reguladoras Diversos*, Rio de Janeiro: ABNT.
- [5] COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. *Proteção digital de sistemas elétricos de potência*, 1st ed. São Carlos: Editora USP, 2007
- [6] Siemens, "Protection devices," 21 de junho 2010. [Online]. Disponível em: <http://www.siprotec.com>
- [7] SEL, "Museu da proteção," 21 de junho 2010. [Online]. Disponível em: <http://www.selinc.com.br>