

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Avaliação das subestações rebaixadoras convencionais e  
sua substituição por subestações digitalizadas**

Pedro Jean de Souza Martins

**ORIENTADOR:** Ruy Alberto Corrêia Altafim

São Carlos

2014



**PEDRO JEAN DE SOUZA MARTINS**

**Avaliação das subestações rebaixadoras convencionais e  
sua substituição por subestações digitalizadas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
sistemas de energia e automação

ORIENTADOR: Ruy Alberto Corrêia Altafim

São Carlos

2014



AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Martins, Pedro Jean de Souza  
Avaliação das subestações rebainadoras  
convencionais e sua substituição por subestações  
digitalizadas / Pedro Jean de Souza Martins;  
orientadora Ruy Alberto Corrêa Altafim. São Carlos,  
2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Aeronáutica) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2014.

1. relé eletromecânico. 2. relé digital. 3.  
subestações . 4. proteção digital. 5. vantagens. I.  
Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Pedro Jean de Souza Martins

Título: "Avaliação das subestações rebaixadoras convencionais e sua substituição por subestações digitalizadas"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 24 / 11 / 2014,

com NOTA 7,0 (sete, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim - (Orientador - SEL/EESC/USP)*

*Mestre Daniel Augusto Pagi Ferreira - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

*Mestre Fillipe Matos de Vasconcelos - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel

## Sumário

Resumo .....	11
Abstract .....	13
Capítulo 1: Introdução .....	15
1.2 Motivação .....	16
1.3 Objetivo .....	16
1.4 Organização .....	16
Capítulo 2: Estrutura geral da subestação .....	17
Capítulo 3: A evolução da estrutura física dos relés .....	24
3.1 Relé eletromecânico .....	24
3.2 Relé analógico estático .....	26
3.3 Relé digital estático .....	27
Capítulo 4: Vantagens na substituição dos relés eletromecânicos .....	29
4.1 Tamanho reduzido .....	29
4.2 Ausência da inércia de disco .....	29
4.3 Maior faixa de temperatura de operação .....	29
4.4 Funcionamento homogêneo .....	30
4.5 Possibilidade de múltiplos ajustes .....	30
4.6 Menor necessidade de manutenção .....	30
4.7 Fonte de alimentação .....	31
4.8 Peças para a reposição .....	31
4.9 Adaptabilidade .....	32
4.10 Processamento de dados .....	32

4.11 Comunicação entre relés .....	32
4.12 Oscilografia.....	33
Capítulo 5: O relé eletromecânico empregado .....	34
5.1 Ajustes do relé eletromecânico .....	36
Capítulo 6: Características do relé digital.....	38
Capítulo 7: Parametrização do relé SEL- 451 .....	42
Capítulo 8: Considerações financeiras e operacionais do processo de substituição.....	45
Capítulo 9: Conclusão .....	46
Referências Bibliográficas .....	47



## Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama unifilar da subestação.....	14
Figura2: Para raio de entrada da subestação .....	18
Figura3: Seccionadora Tripolar de montagem horizontal .....	19
Figura 4: Seccionadora Tripolar de montagem vertical .....	19
Figura 5: Disjuntor de Alta Tensão .....	20
Figura 6: Transformador de Potência.....	20
Figura 7: Disjuntor de Baixa Tensão.....	21
Figura 8: Conexão entre a alta tensão e os relés de Proteção .....	22
Figura 9 : Painel de relés eletromecânicos .....	23
Figura 10: Proteção de um alimentador .....	24
Figura 11: Estrutura de Charneira .....	25
Figura12: Estrutura de um relé de disco.....	25
Figura 13: Discos sobre a ação dos fluxos magnéticos .....	26
Figura 14: Relé analógico Estático.....	27
Figura 15: Relé digital.....	28
Figura 16: Oscilografia.....	33
Figura 17: Relés eletromecânicos instalados em uma painel .....	34
Figura 18: Relé eletromecânico removido do <i>housing</i> .....	35
Figura19: Vista Frontal relé digital SEL -451 .....	38
Figura 20: Vista traseira relé digital SEL – 451 .....	38
Figura 21: Processador de comunicação SEL- 2032.....	40
Figura 22: Sincronizador SEL-2407 .....	41

Figura 23: Conexão entre equipamentos .....	41
Figura 24: Janela inicial do software.....	42
Figura 25:Ajustes internos do software do Relé.....	42

## **Resumo**

Ao observar – se o sistema elétrico brasileiro nota - se a existência de subestações antigas, ainda protegidas por relés eletromecânicos, e subestações de construção mais recente, que são protegidas por relés digitais.

As subestações de proteção digital, apresentam uma menor necessidade de manutenção, são monitoradas de forma remota e apresentam uma maior confiabilidade e seletividade.

Diante destas vantagens, este trabalho busca demonstrar os ganhos na substituição dos relés eletromecânicos ainda empregados, por relés digitais.

Para esta demonstração, se utilizará de um estudo de caso, realizado em uma estrutura típica, de uma subestação de proteção eletromecânica. Este estudo de caso será dividido da seguinte forma:

Apresentada da estrutura física da subestação, e um breve relato sobre a evolução da estrutura física do relé, com objetivo de contextualização.

Em seguida, serão enumeradas algumas vantagens já conhecidas, pela literatura técnica.

E por fim serão apresentados o relé eletromecânico empregado, e uma proposta de substituição destas relés, com o objetivo de comprovar as vantagens enumeradas.

Palavras chave: relé eletromecânico, relé digital, subestações, proteção digital, vantagens.



## **Abstract**

Observing the Brazilian electrical system can see still old substations protected by electromechanical relays, and more recent construction of substations, which are protected by digital relays.

The substations of digital protection, have less need for maintenance, are monitored remotely and have a higher reliability and selectivity.

This paper stresses the gains in replacement of electromechanical relays still employed by digital relays.

For this demonstration, it will use a case study in a typical structure of an electromechanical protection substation. This case study will be divided as follows:

Presented the physical structure of the substation, and a brief account of the evolution of the physical structure of the relay, with the objective of contextualization.

Then they list some advantages already known, the technical literature.

Finally will be presented the electromechanical relay employee, and a proposal to replace these relays, with the intent of proving the listed advantages.

**Keywords:** electromechanical relay, digital relay, substations, digital protection, benefits



## Capítulo 1: Introdução

Os relés eletromecânicos foram os primeiros relés de proteção utilizados no sistema elétricos de potencia, foram amplamente utilizados para proteção tanto de unidades geradoras, como na transmissão e na distribuição de energia elétrica.

Estes equipamentos eram robustos, constituídos por peças móveis e atendiam as necessidades de proteção do período, no entanto, com a evolução da eletrônica, e dos microprocessadores, foram criados os relés digitais.

Os relés digitais são menores, capazes de processar a informação recebida de campo e apresentam múltiplas funções em um único equipamento. Estas vantagens fizeram com que os novos relés fossem empregados nos novos projetos de subestações, e substituíssem os relés eletromecânicos em muitas subestações reformadas.

Entretanto, ainda existem em campo, muitos equipamentos eletromecânicos instalados, principalmente em subestações distribuidoras de energia, isto ocorre em parte pelo fato da tecnologia eletromecânica atender as necessidades básicas de funcionamento da subestação.

Outro ponto a ser considerado, é fato de estes equipamentos já serem amplamente conhecidos pelo corpo técnico dispensando assim a necessidade de treinamento de pessoal, ou de uma mudança no *lay-out* da sala de operação.

### 1.2 Motivação

Este trabalho surgiu a partir de um estudo de caso referente a substituição de relés eletromecânicos empregados em uma subestação de distribuição de energia elétrica.

Os principais motivos que geraram a substituição destes relés foram a busca contínua da distribuidora por uma melhor operação do seu sistema elétrico, sendo as vantagens mais notórias: o fato de o relé poder ser comandado remotamente, o fato de necessitar de uma menor quantidade de manutenções, e a possibilidade de um monitoramento remoto dos alimentadores.

Por poder ser comandado de forma remota permite - se tentado um fechamento do disjuntor da subestação, sem a necessidade de se descolar uma equipe até o local. Isto impacta diretamente no faturamento da empresa, pois segundo PRODIST,(2010) cabe as concessionárias de energia ressarcir seus clientes, quanto ao período no qual estes ficarem com o fornecimento de energia interrompido.

A menor quantidade de manutenção representou ganhos financeiros, principalmente pelo fato de não existir uma equipe de técnicos fixos na subestação, sendo necessário deslocá-los para a realização de manutenções.

### **1.3 Objetivo**

Este trabalho tem por objetivo gerar um material complementar, que tem a finalidade de demonstrar exemplos práticos de projetos de engenharia a ser utilizado na disciplina SEL-0350.

### **1.4 Organização**

Este trabalho se organizará na seguinte ordem:

Inicialmente será apresentada a estrutura física da subestação, nesta apresentação serão descritos os equipamentos instalados em campo, assim como as funções de proteção dedicadas a cada equipamento.

Após a descrição dos equipamentos em campo, será feito um breve relato sobre a evolução da estrutura física do relé de proteção, neste relato serão pontuadas algumas evoluções da estrutura.

Após o relato, serão listadas algumas vantagens conhecida pela literatura técnica quanto a utilização de relés digitais.

E por fim, será descrito a estrutura física e os ajustes referentes ao relé eletromecânico atualmente utilizado na subestação assim como uma proposta de substituição deste relé por um equipamento digital.



## Capítulo 2: Estrutura geral da subestação

A Subestação a qual será apresentada uma proposta de digitalização trata-se de uma subestação Rebaixadora de distribuição de energia elétrica

A mesma é a única subestação da cidade na qual está inserida, e apresentava a configuração descrita neste trabalho até o início do ano de 2013.

Na Figura 1, observa-se o diagrama unifilar da subestação.

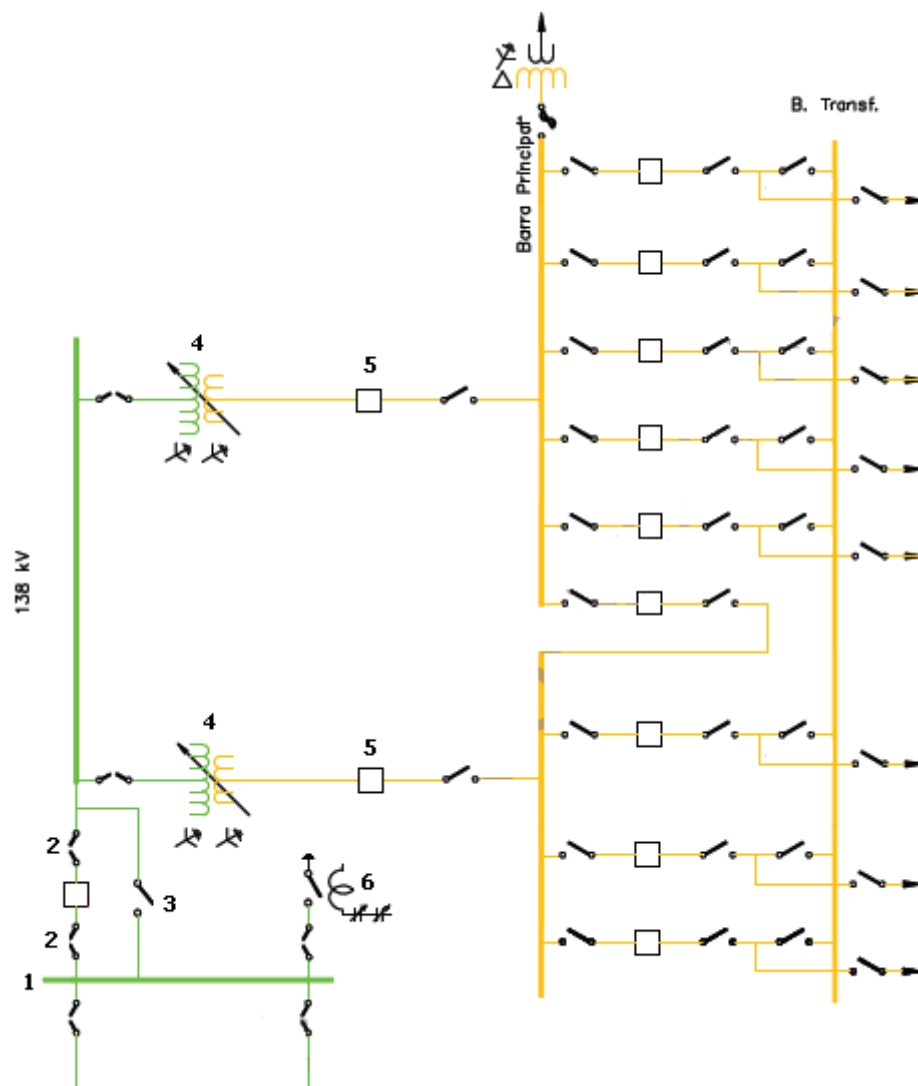


Figura 1: Diagrama Unifilar da Subestação

As torres de alimentação da companhia de transmissão de energia entregam a alimentação no pórtico de entrada da Subestação. Em seguida, os cabos de alimentação passam pelos para-raios de entrada. Este equipamento tem a função de evitar que sobretensões oriundas de descargas atmosféricas danifiquem equipamentos na subestação.



Figura 2: para raio de entrada da subestação

Em seguida eletricamente ligado ao pórtico de entrada, observa – se na Figura 1 indicado pelo número 6, a chave de terra. Este equipamento consiste em uma tecnologia antiga que tinha função de substituir a proteção do disjuntor geral de alta quando o mesmo se encontrasse em manutenção. O equipamento tinha a função de aterrar rapidamente as linhas de transmissão, quando estas se encontrassem sobre falta, forçando, assim, uma rápida atuação dos relés.

Ainda na Figura 1 e indicados pelos números 2 e 3, tem - se as chaves seccionadoras estes equipamentos tem a função de isolar eletricamente tanto o disjuntor geral de alta tensão como de isolar os transformadores.

Observa-se que a abertura em carga nunca é feita pelas chaves seccionadoras, pois seus contatos não foram desenvolvidos para suportar as altas temperaturas do processo de abertura, esta função é exercida pelo disjuntor, e somente após a extinção da corrente elétrica é que a isolação dos equipamentos é feita abrindo-se as seccionadoras.

Na subestação estudada existem seccionadoras montadas horizontalmente, e verticalmente, como pode ser observado nas Figuras 3 e 4.



Figura 3: Seccionadora tripolar de montagem horizontal



Figura 4: Seccionadora tripolar de montagem vertical

Entre as chaves seccionadoras, observa-se o Disjuntor Geral de Alta tensão. Este equipamento tem a função de romper a corrente de falta, caso ocorra uma falta nos transformadores de potencia da subestação. O mesmo pode ser observado na Figura 5.



Figura 5: Disjuntor de Alta tensão.

Após o disjuntor, tem-se dois transformadores de potência. Estes tem uma potencia de 18,5 MVA, cada um, podendo operar tanto separadamente como em paralelo. Na figura 6, observa-se um destes transformadores:



Figura 6: Transformador de potência.

Após passar pelos transformadores, tem – se o barramento de saída da subestação. Este barramento, juntamente com a barra de transferência, permite que um alimentador assuma parte da carga de outro aumentando a confiabilidade do sistema. A barra em questão também é seccionada, o que permite operar com os transformadores individualmente ou em paralelo.

Neste barramento estão alocados 9 disjuntores, sendo 8 deles responsáveis pela proteção dos alimentadores e 1 responsável por fechar a barra colocando os dois transformadores em paralelo.

Na figura 7 observa-se um destes disjuntores:



Figura:7: Disjuntor de Baixa Tensão

As conexões entre a alta tensão e os sistemas de proteção da subestação são realizadas através de transformadores de corrente e transformadores de potencial.

Na figura 8, são representadas as conexões entre estes transformadores e o sistema elétrico, nota-se que os alimentadores são protegidos por relés de sobre corrente instantâneos e temporizados (50/51), apresentando também relés de religamento representados pelo número 79.

Ainda na figura 11, observa –se que os transformadores são protegidos por relés de sobrecorrente , e relés diferenciais que geram sinal de abertura para o disjuntor Geral de Alta tensão.

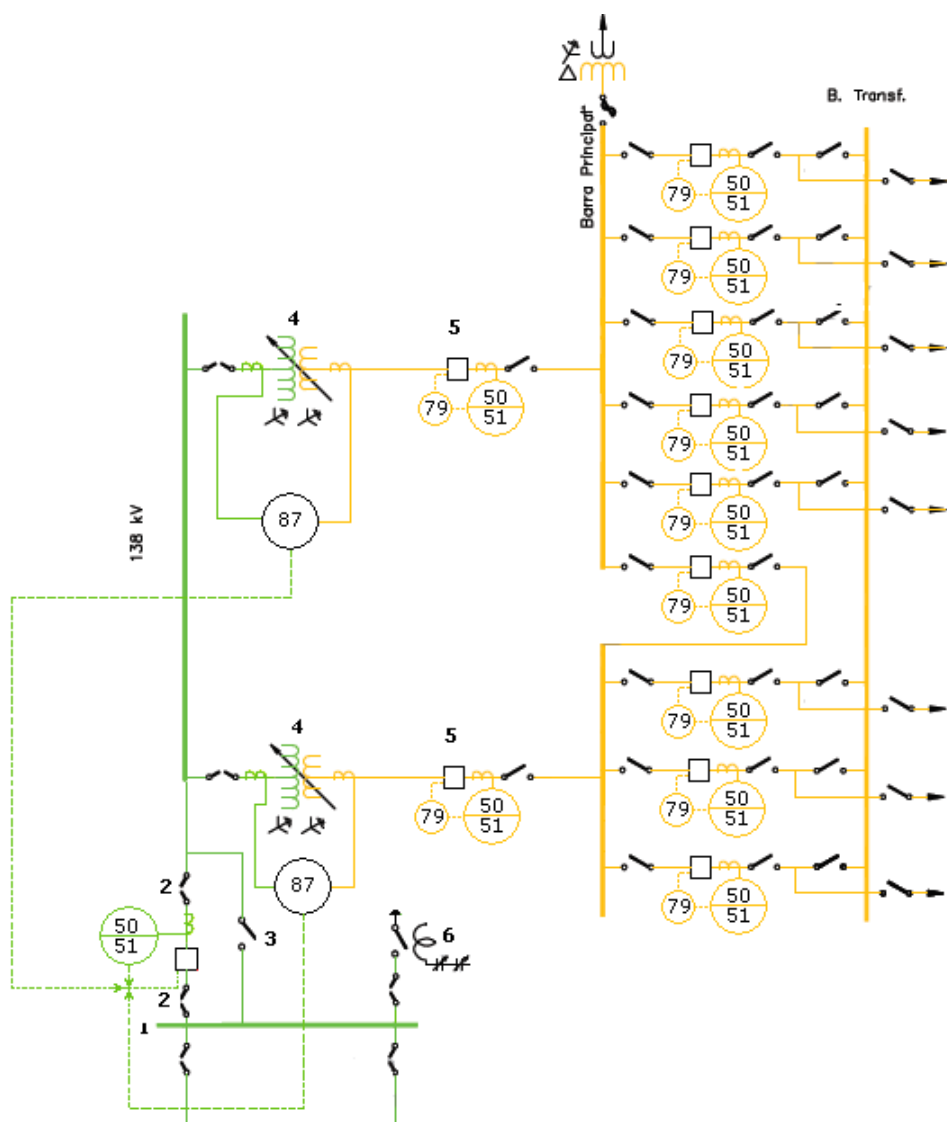


Figura 8: Conexões entre a alta-tensão e os relés de proteção



Figura 9 :Painel de Relés Eletromecânicos



Após terem seu nível de tensão reduzido pelos transformadores de corrente e tensão, os sinais gerados são levados para a sala de comando e entram no painel indicado pela Figura 9.

Cada porta deste painel representa a proteção de um alimentador, nelas estão inseridos 3 relés de sobrecorrente eletromecânicos, o relé de religamento e um relé estático de alta impedância.



Figurara 10: Proteção de um alimentador

Sendo os relés eletromecânicos indicados pela curva superior esquerda, o relé de alta impedância indicado pela curva superior direita e o relé de religamento indicado pela curva inferior da Figura 10.

Outras proteções também são empregadas na subestação como, por exemplo, o monitoramento da frequência da tensão de entrada da subestação, e proteções internas ao transformador, no entanto, estas proteções não são objetos deste estudo deixando de serem representadas na Figura 8.

## Capítulo 3: A evolução da estrutura física dos relés

Segundo Elmore (2003) os relés de proteção são agrupados, segundo a sua lógica construtiva, em 3 grupos: relés eletromecânicos, relés estáticos analógicos e relés estáticos digitais.

### 3.1 Relé eletromecânico

Os relés eletromecânicos foram os primeiros a serem construídos. Segundo Rosen (1998), os relés eletromecânicos são dispositivos que utilizam - se de propriedades magnéticas do circuito de entrada para realizar alterações em um dispositivo mecânico como: Armaduras, discos ou êmbolos.

Segundo Caminha (1977) a estrutura mais elementar dos relés eletromecânicos é conhecida como charneira, a mesma é composta por um núcleo fixo envolto em uma armadura de estrutura móvel. Na Figura 11, pode - se observar a estrutura Charneira:

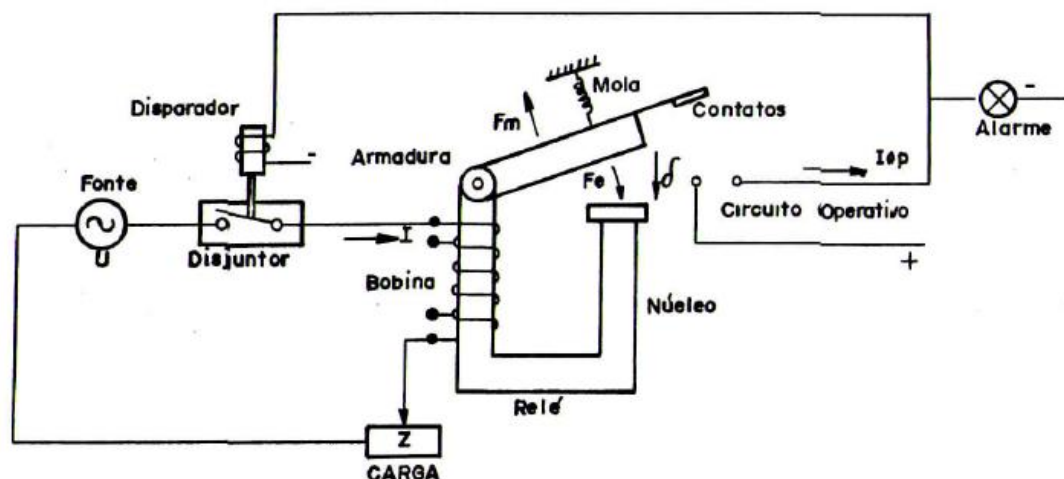


Figura 11: Estrutura de Charneira.

Fonte: Caminha (1977)

A parte móvel da armadura é conectada ao contato elétrico, e sua movimentação é dependente do equilíbrio entre a força magnética em ação sobre a armadura e a força elástica de uma mola. De forma que, quando a força da mola é maior que a força magnética, o contato se encontra aberto. Já quando a força magnética é maior o contato se fecha.

Como a força magnética é proporcional ao quadrado da corrente sobre a bobina, e a força exercida pela mola é dada pela lei de Hooke e é proporcional ao alongamento da mesma chega -se a expressão genérica:



$$Fr = k_1 * I^2 - k_2 * d \quad (3.1)$$

Sendo:

$k_2$  = constante elástica da mola

$k_1$  = constante de proporcionalidade da corrente

$I$  = corrente na bobina

$d$  = distancia cuja qual a mola se alongou

Apesar de a estrutura de Charneira, ser a mais simples, a estrutura comercial, mais utilizada é a estrutura tipo disco.

Na Figura 12, observa –se a estrutura deste relé.

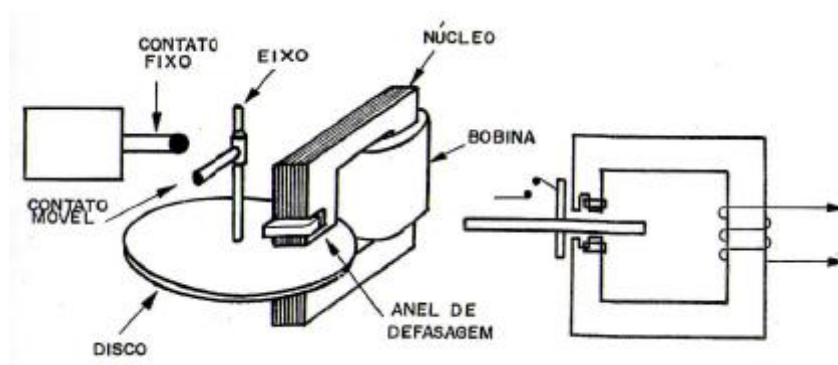


Figura 12: Estrutura de um relé de disco

Fonte: Caminha (1977)

Segundo Caminha, (1977) um transformado de corrente alocado no campo, fornece a bobina indicada na Figura 12 uma corrente proporcional a corrente a do equipamento protegido pelo relé.

Com isto gera – se sobre o núcleo, indicado na figura 12, um fluxo magnético proporcional a corrente do equipamento protegido, este fluxo magnético, ao atingir com o anel defasador divide – se em dois fluxos.

Um fluxo  $\Theta_1$ , que passou pelo anel de defasagem , e um fluxo  $\Theta_2$  que não passou pelo anel. Pelo fato do anel apresentar uma relutância diferente da relutância magnética do núcleo estes fluxos são defasados de forma diferente no tempo.

Os fluxos defasados, ao atingirem o disco do relé, induzem sobre este, correntes distribuídas, proporcionais aos respectivos fluxos. No entanto, estas correntes apresentam a mesma defasagem existente entre os fluxos que os geraram. As correntes ao interagirem com o fluxo diferente do fluxo que a gerou geram as forças  $F_1$  e  $F_2$ , e estas provocam um movimento de rotação no disco. Como pode ser observado na figura 13.

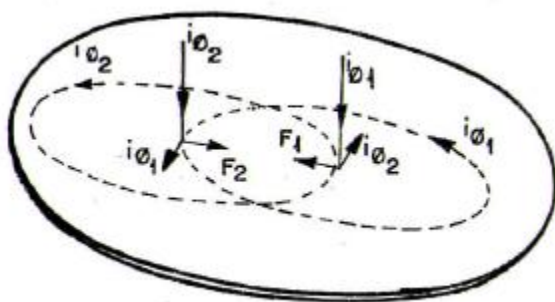


Figura 13: Disco sobre a ação dos fluxos magnéticos

Fonte: Caminha (1977)

Nota – se que, quanto maior a corrente do equipamento em campo, maior será a corrente fornecida pelo transformador de corrente a bobina, maior serão os fluxos magnéticos, e as correntes distribuídas nos discos, e maiores as forças geradas. Assim, pode –se concluir que quanto maior a corrente sobre o equipamento protegido, maiores será o torque sobre o disco.

Conforme pode ser observado na Figura 12, o disco é acoplado ao eixo, e ao se movimentar fecha um contato elétrico, sobre este mesmo eixo são colocadas molas e imãs com a função de se oporem a movimentação das forças.

Em condições normais de funcionamento, as molas evitam que o disco se movimente, no entanto, durante uma falta, as forças  $F_1$  e  $F_2$  vencem a resistência da mola girando o disco e fechando o contato elétrico, o que envia um sinal de abertura ao disjuntor que protege este equipamento.

### 3.2 Relé Analógico estático

Com a evolução da eletro-eletronica, conseguiu-se simular o comportamento dos dispositivos mecânicos, em circuitos elétricos estes equipamentos não se utilizam ainda de microprocessadores

para a digitalização do sinal adquirido em campo. Sendo uma tecnologia intermediária entre os relés eletromecânicos e os relés digitais atuais.

Segundo Rosen, et al, (1998): Um relé analógico estático é um equipamento capaz de emular as características de seus homólogos eletromecânicos, apresentando normalmente mais de uma função em um único dispositivo.

Os equipamentos estáticos analógicos já possuem dimensões muito menores que seus homólogos eletromecânicos, esta tendência se intensificou ainda mais nos relés digitais.

Observa-se na Figura 14 um relé Analógico Estático empregado na subestação estudada, este equipamento Monitora a impedância dos alimentadores, através de uma comparação entre a tensão e a corrente do mesmo. Caso este valor caia a baixo, de um valor pré-estabelecido é enviado um sinal de abertura ao disjuntor.



Figura 14: Relé Analógico Estático

### 3.3 Relé digital estático

Os relés digitais representam equipamentos que utilizam – se de técnicas de processamentos de sinais para a conversão do sinal analógico enviado pelos equipamentos em campo para sinais digitais.

Segundo, Rosen, et al (1977) os relés estáticos digitais convertem a entrada analógica em um sinal digital por meio de um processo de amostragem gerido por um processador. Este processo gera relés multi – fase de várias funções que tem a capacidade de serem programados e monitorados através de uma rede de comunicação, realizando autoanálise e gravação de eventos.

Dentro desta categoria encontram –se todos os IED (Intelligent Electronic Devices), cuja a proposta deste trabalho sugere substituir a tecnologia eletromecânica em subestações onde esta tecnologia ainda é empregada.

Um exemplo de um relé estático digital é o relé SEL - 751 que pode ser observado na Figura 15



Figura 15: Relé digital

Fonte: SCHWITZER, (2014, d)

## **Capítulo4: Vantagens na substituição dos relés eletromecânicos**

Nestes capítulo serão apresentados algumas das diversas vantagens dos relés digitais , sobre os relés eletromecânicos sendo estas:

### **4.1 Tamanho reduzido**

Os relés eletromecânicos são equipamentos robustos produzidos com diversas peças metálicas. Essas peças são grandes, quando comparadas aos componentes eletrônicos, pois são responsáveis por gerar o torque de ativação do dispositivo e necessitam suportar os desgastes mecânicos.

Outro fator que contribuiu para a redução do tamanho do equipamento, foi a capacidade que o relé digital tem de incorporar várias funções em um único dispositivo, isso permitiu reduzir o número de encapsulamentos, reduzindo o volume ocupado no painel.

### **4.2 Ausência da inércia de disco**

Segundo Rosen et al (1998) nos relés de indução, a marcação do tempo de acionamento dos contatos é feita por um disco que se move. No entanto, este disco possui uma inércia de movimento o que não o permite parar instantaneamente. Assim existe uma pequena movimentação do disco, mesmo após ser removida a falta, e esta movimentação pode gerar erros de seletividade. Um exemplo desta falha seria o acionamento de um relé a montante, devido a inércia do disco, mesmo após a remoção desta falta por um relé a jusante.

Como os relés digitais não possuem disco, não há o problema da inércia de disco permitindo assim uma seletividade mais confiável do sistema de proteção.

Uma das alternativas para se conseguir que não ocorra o “*over travel disk*” consiste em aumentar o intervalo de tempo entre reles, o que aumenta o tempo de resposta do sistema a faltas reais.

### **4.3- Maior faixa de temperatura de operação**

Segundo o Rosen et al (1998) os relés estáticos apresentam uma faixa de temperaturas de operação típica que vai de 40 °C até +55 °C, já os reles estáticos apresentam uma faixa de operação que vai de -40°C até 70°C.

Esta faixa maior de temperatura torna se interessante por reduzir as necessidades de sistemas de resfriamento da sala de comando, permitindo até mesmo a instalação dos relés de proteção fora da sala de comando.

#### **4.4 – Funcionamento homogêneo**

Segundo Rosen et al (1998) dispositivos eletromecânicos apresentam desgastes mecânicos, e estes alteram as características iniciais calibradas no equipamento. Essas alterações na resposta do equipamento, em função de desgastes, reduzem a confiabilidade do sistema de proteção como um todo. Relés digitais, por sua vez, não possuem desgastes de natureza mecânica, com isto, o equipamento apresenta um funcionamento mais contínuo e uma maior confiabilidade.

#### **4.5 – Possibilidades de múltiplos ajustes**

Os relés digitais possuem a possibilidade de armazenar vários grupos de ajustes em sua memória, essa possibilidade facilita a operação de sistemas que necessitem de mudança de ajuste com certa frequência.

Um exemplo da utilidade desta função seria o momento no qual um alimentador assume a carga de outro em função da manutenção de um disjuntor.

Neste momento o disjuntor que assumiu a carga apresenta um aumento considerável de sua corrente nominal, e para que suas proteções não atuem é necessária uma nova parametrização de seus relés.

Caso seus relés sejam eletromecânicos estes tem que ser retirados de operação e realizado um procedimento que será melhor detalhado no capítulo 6. Já se o dispositivo for digital essa nova parametrização pode ser realizada pressionando - se poucos botões na interface homem máquina do equipamento, ou até mesmo de forma remota.

#### **4.6 – Menor Necessidade de Manutenção**

Segundo Rosen, (1998) os fabricantes de relés fornecem pouca informação sobre a necessidade de manutenção do seu equipamento. No entanto, devido as possibilidade de desgastes e corrosões que podem provocar alterações nas calibrações, costuma-se realizar manutenções preventivas nestes equipamentos a cada 2 anos.

Nos relés digitais, entretanto, essa necessidade de manutenção é bastante reduzida, pois além das características de sua construção reduzir os desgastes, os dispositivos normalmente apresentam rotinas de autoverificação. Essa redução na necessidade de manutenção, reflete nos custos operacionais das subestações, pois minimiza a necessidade de deslocamentos de equipes, custos com estadia , alimentação e reduz -se o número de técnicos necessários na equipe.

#### **4.7 – Fonte de Alimentação**

Pelo fato de relés digitais necessitarem de uma alimentação própria é dos relés eletromecânicos serem autoalimentados pode-se considerar esta característica como uma desvantagem dos relés digitais, pois, na ausência de uma fonte de energia, o mesmo para de operar.

No entanto, os relés eletromecânicos também operam de forma indevida caso o banco de baterias da subestação venha a apresentar falhas. Isso ocorre, porque numa eventual falha do banco de baterias concomitante a uma falta no Sistema Elétrico de Potencia, realmente o relé eletromecânico comutará de estado, mas o comando de abertura não será enviado aos disjuntores, pois este sinal necessita do banco de baterias.

Já nos novos relés digitais, é comum a existência de funções de monitoramento da fonte de energia, assim como a existência de baterias internas ao relé. Com isso, assim que o banco de baterias da subestação apresentar falhas, o relé enviará um sinal de alarme para o centro de operação.

Por fim, esta aparente desvantagem do relé digital se converte em uma vantagem, pois ambos os equipamentos apresentaram ausência de comando de fechamento para o disjuntor em uma eventual falta de fonte de energia, mas o relé digital te informará quando isso ocorrer. Assim o centro de comando enviar uma equipe a subestação para corrigir a falha.

#### **4.8 – Peças para Reposição**

Apesar de ainda existirem muitas subestações que ainda utilizam da tecnologia de relés eletromecânicos, e destas necessitarem de manutenções frequentes, existe uma grande dificuldade de se obter novas peças para estes dispositivos no mercado.

Isto vem ocorrendo, porque, apesar de serem frequentes as manutenções, elas demandam mais de mão de obra do que de peças. E principalmente, porque os novos projetos utilizarem da nova tecnologia digital.

Isso faz com que fabricantes invistam nesse novo mercado, deixando os usuários dos relés eletromecânicos carentes de peças de reposição.

O que normalmente é feito, quando surge a necessidade de peças é reutilização das peças ainda boas de equipamentos em avaria. Esse fenômeno evidencia que os relés digitais estão suplantando os analógicos.

## 4.9 - Adaptabilidade

Uma grande vantagem do relé digital é a sua capacidade de adaptabilidade, isso ocorre, porque as lógicas internas podem ser completamente alteradas em função das entradas.

As programações destas funções permitem ao engenheiro de proteção criar controles que se adaptem perfeitamente as necessidades do usuário sem a necessidade de equipamentos adicionais ao relé.

Essa fácil adaptação do relé também permite que um mesmo dispositivo possa ser utilizado em diferentes projetos. Segundo OH, et al(2011), as IEDs tem uma estrutura muito flexível de *hardware* e *software* podendo ser aplicado em muitos processos de automação de subestações.

## 4.10- Processamento de dados

A presença de microprocessadores no interior do dispositivo, permite ao relé digital realizar várias modalidades de proteção que seriam impensáveis aos relés eletromecânicos.

Um exemplo é a proteção adaptativa, ou a implementação de filtros digitais, que permitem a extração das sequências positivas, negativas e zero dos sinais de tensão e corrente.

Normalmente o método de filtro é pré-definido pelo fabricante, ficando ao engenheiro eletricitista, que está projetando o sistema, opções como a taxa de amostragem dos filtros ou a opção de como utilizar a informação extraída pelo mesmo.

## 4.11 – Comunicação entre Relés

Na tecnologia eletromecânica, a comunicação era feita exclusivamente pelo chaveamento de contatos elétricos. Já com os relés digitais, este paradigma foi mudado por meio da utilização de protocolos de comunicação.

Com implementação dos relés digitais muitos fabricantes passaram a desenvolver protocolos de comunicação diferentes, o que passou a dificultar a integração entre dispositivos de fabricantes diferentes.

No entanto, grande parte dos fabricantes passaram a utilizar –se dos protocolos da Ethernet industrial. Este protocolo, por sua vez, foi incorporado a norma IEC 61850, e esta passou a ser utilizada amplamente pelos fabricantes. Isso permitiu que equipamentos de diferentes fabricantes fossem integrados em um único sistema de proteção.



## 4.12 - Oscilografia

Segundo Souza, B. A, et al conceitualmente, a oscilografia constitui-se na aquisição das grandezas do setor elétrico ( corrente e tensão), além das sinalizações provenientes das cadeias de proteção quando da ocorrência de uma falta no sistema. Os equipamentos designados para esse fim são denominados oscilógrafos, que, quando interligados remotamente a computadores dedicados à aquisição de dados, configuram as chamadas redes de oscilografia”.

Este registro passa a ser realizado também pelos relés digitais, o que representa uma economia no custo global do projeto de proteção. Na figura 16 observa-se a extração de uma oscilografia.

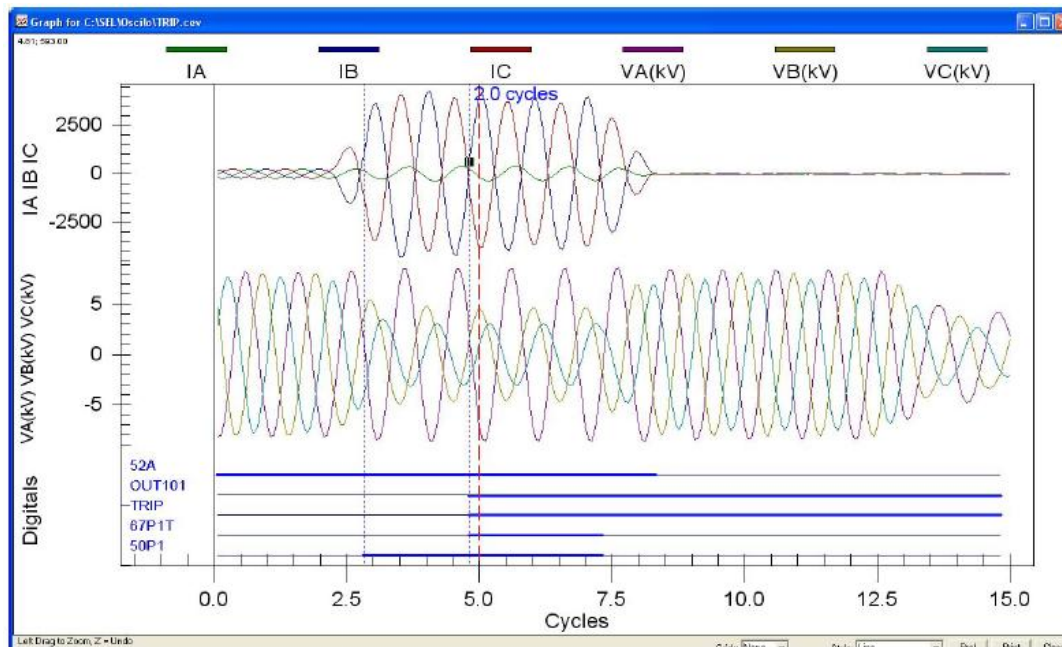


Figura 16: Oscilografia

Fonte: Cardoso (2014)

## Capítulo 5: O relé eletromecânico empregado

Os relés empregados na subestação estudada trata-se de um equipamento monofásico tipo disco de curva extremamente inversa.

O dispositivo possui a função 50 (relé de sobrecorrente instantâneo) e 51 (relé de sobrecorrente temporizado) assim como indicadores visuais da função atuada.

Na Figura 14, tem-se 4 destes instalados em um painel.



Figura 17: relés eletromecânicos instalados em um painel

Os relés ficam alocados dentro da sala de comando da subestação em painéis que os separam em função do equipamento os quais protegem.

Eles são conectados ao campo através de cabos elétricos que os ligam aos transformadores de corrente.

O comando de abertura também é enviado aos disjuntores através dos contatos elétricos que são indicados pelo número 9 (nove) na Figura 15.

Ao se retirar o relé de seu *housing* (encapsulamento que o encaixa ao painel) depara-se com a seguinte estrutura interna:

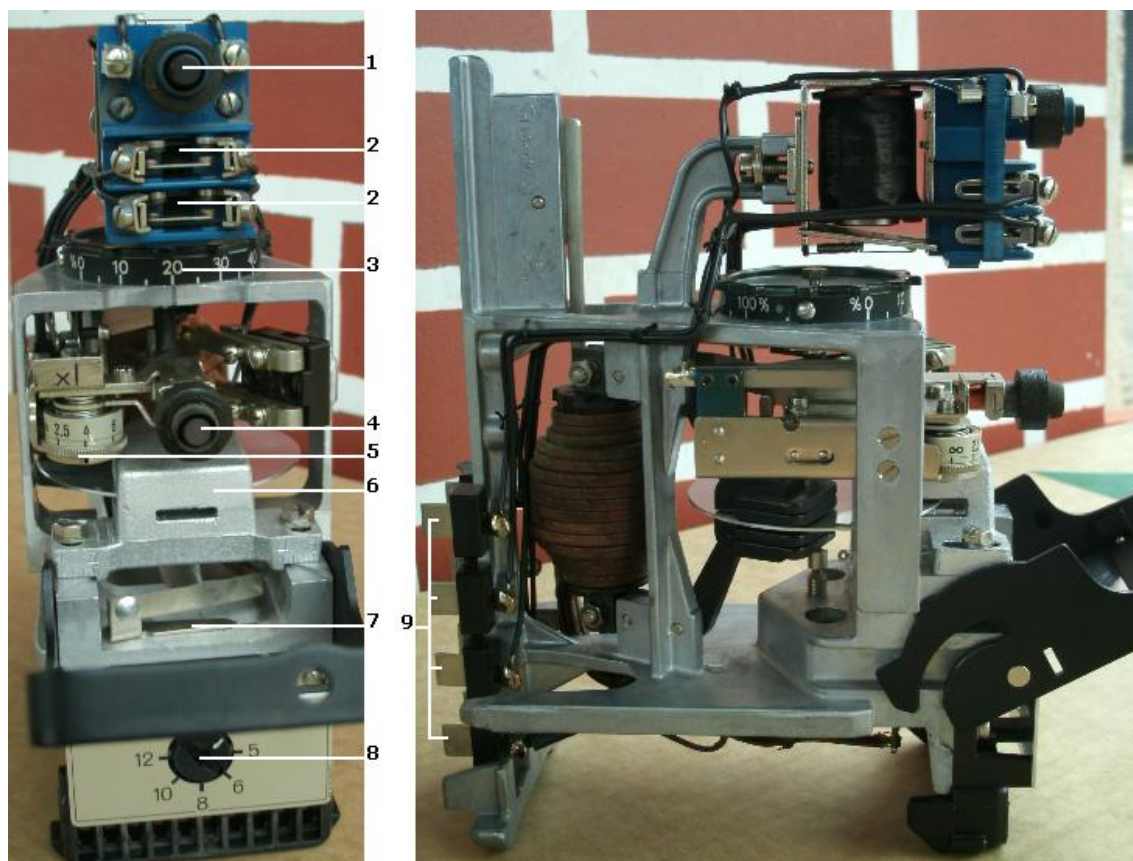


Figura 18: Relé eletromecânico removido do *housing*

- 1 –Indicação de atuação da função 51 (relé de sobre corrente temporizado).
- 2- Contatos elétricos, cuja movimentação gera o sinal de *tripping*.
- 3– Ajuste de tempo, para selecionar a área de excursão do disco.
- 4 – Indicadores de atuação do relé por sobrecorrente instantânea
- 5 – Ajuste da função de 50 (relé de sobre corrente instantâneo)
- 6 – Ímã de frenagem do disco
- 7 – Ajuste da mola de frenagem
- 8 – Ajuste da corrente nominal
- 9 – Contatos de conexão entre o relé e o *housing*

## 5.1 Ajustes do relé eletromecânico

Segue as opções e procedimentos de ajuste para o relé eletromecânico:

**Curva Inversa, muito inversa , ou extremamente inversa:** A escolha da curva para o relé é feita ao se comprar o equipamento, pois ela é dependente de característica mecânicas como: o material que o disco é feito e as dimensões do mesmo , logo não pode ser alterada com meros ajustes no dispositivo.

**Corrente do rele temporizado (função 51):** Para a escolha da corrente que iniciará o giro do disco, deve-se girar o elemento 8, indicado na Figura 15, e selecionar a corrente desejada.

**Corrente do rele instantâneo (função 50):** Para o ajuste desta função deve – se considerar o valor da corrente temporizada como base.

Definida uma corrente de *pick – up* instantâneo, deve – se dividir este valor pela corrente temporizada ajustada. E o valor obtido deve ser ajustado no elemento 5 da Figura 15. Assim tem – se:

$$A = \frac{Ii}{It} \quad \text{Equação 4.1}$$

Sendo:

A: valor ajustado no elemento 5 , da figura 15.

Ii: O valor definido para o elemento instantâneo do relé

It: o valor definido para o elemento temporizado do relé

**Time load (Ajuste de tempo):** *time load* é ajustado através do elemento indicado, na Figura 15, pelo número 3. As marcações do elemento são percentagens de voltas do disco. Assim, quando se seleciona 20, o disco terá de se mover 1/5 de volta completa até enviar o comando de abertura para os disjuntores.

O disco apresenta velocidade constante durante sua movimentação. Isto significa que mantida a corrente de entrada constante, o tempo de acionamento é proporcional ao valor selecionado no elemento 3.

**Verificação:** inseridos os parâmetros, deve – se verificar se o mesmos estão corretos. Para isto, conecta-se ao relé um gerador de corrente que possua a função de oscilografia.

Esta conexão é feita através do elemento 9 da Figura 15. O equipamento irá injetar uma corrente na bobina do relé e medir o tempo para que este responda enviando o sinal de *pick – up*.

Caso estes valores estejam coerentes com os valores parametrizados, comprova-se que o equipamento foi parametrizado com sucesso e o mesmo pode ser devolvido ao painel de controle.

Caso o mesmo forneça valores insatisfatórios para os valores ajustados, isto indicará que a inserção de parâmetros foi feita de forma incorreta, ou que o equipamento sofreu desgastes mecânicos que o fizeram perder sua calibração.

Neste caso, deve –se verificar os parâmetros inseridos , e constatado que não é um erro de inserção dos parâmetros, deve –se alterar os valores calibrados para a mola que é ajustada no elemento, e para o ímã que se encontra no elemento 6. Isto altera as características de frenagem do disco. Este último procedimento deve ser repetido até que os valores medidos na oscilografia sejam adequados.

## Capítulo6: Características do relé digital:

Para a substituição do relé eletromecânico, foi escolhido o relé Sel – 451, cuja vista frontal e traseira podem ser vistos nas figura 16 e 17, respectivamente:



Figura 19: Vista Frontal relé digital SEL – 451

Fonte: SCHWITZER, (2014,f)

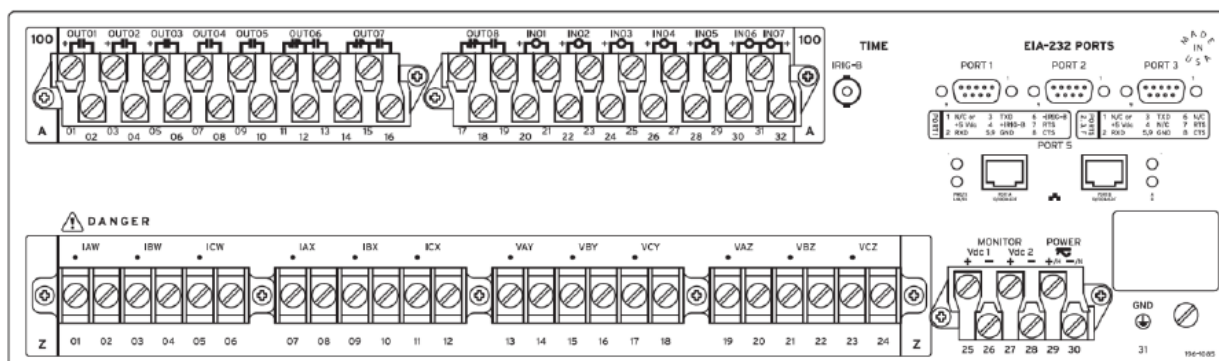


Figura 20: Vista Traseira Relé digital SEL - 451

Fonte: SCHWITZER (2014,f)

As características do equipamento são ideais para o monitoramento de um *bay* com até dois disjuntores, no projeto de substituição aqui descrito, foram utilizados 8 destes equipamentos sendo cada um deles responsáveis pela proteção de um alimentador.

Segundo SCHWITZER(2014,f) pode – se observar as seguintes características no equipamento:

**Proteção contra sobrecorrentes:** O relé apresenta uma estrutura de ajustes com elementos de sobrecorrentes que permitem múltiplos ajustes tanto para características instantâneas quanto temporizadas. Com relação aos elementos instantâneos, é possível 5 opções de curvas US , ou 5 opções de curvas IEC.

**Automação:** Junto dos parâmetros elétricos de proteção, também são possíveis implementar lógicas de automação com a possibilidade de se utiliza até 1000 linhas de programação. Para a implementação desta lógica, utiliza – se de uma linguagem específica do fabricante denominada *Sellogic*.

**Estampas de tempo:** O dispositivo, pode ser conectado a um equipamento GPS, o que possibilita a criação de estampas de tempo nas medições e com isto uma sincronização das medidas realizadas por diversos relés ao longo do sistema elétrico de potência essa ferramenta é muito útil no estudo de faltas.

**Medição em tempo real:** O equipamento possibilita a medição em tempo real dos sincrofasores. Tais medições podem se comunicar diretamente com o SCADA possibilitando um acompanhamento em tempo real do sistema.

**Deteção de faltas de alta impedância:** O rele tem a capacidade de reconhecer faltas de alta impedância, geradas por exemplo pela queda de cabos no extremo do alimentador.

**Comunicação:** Comunica –se em rede com outros IEDs e com o sistema SCADA de acordo com o estabelecido pelas normas internacionais fixadas no IEE C 37.118-2005 utilizando –se dos protocolos DNP3 ou IEC 61850.

**Faz o monitoramento do disjuntor:** O relé faz uma série de acompanhamentos do disjuntor como: número de manobras do disjuntor, tempo de abertura dos contatos e a corrente interrompida nas manobras. Tal acompanhamento, quando combinado com as informações do disjuntor, permite uma manutenção preventiva do disjuntor muito mais assertiva evitando gastos desnecessários com uma manutenção excessiva e ou uma má operação do equipamento.



**Religamento:** O equipamento permite a programação de até 4 ciclos de tentativa de religamento isto comparado aos relés eletromecânicos representa uma economia quanto a utilização de lógicas de comandos externas ao relé.

**Localização de faltas:** O relé apresenta incorporado em sua lógica a função 21 da tabela ANSI.

**Oscilografia e Relatório de eventos:** O equipamento possui a capacidade de guardar a oscilografia das suas entradas analógicas e armazenar esta informação em uma memória interna, o disparo destas oscilografias são controlados por uma ajustes , e o número máximo de oscilografias arazenadas é dependente da taxa de amostragem selecionada.

**Adaptabilidade rápida:** Pode armazenar até 6 grupos de ajustes distintos. A escolha entre estes grupos de ajuste é rápida e pode ser feita no painel frontal do equipamentos. Isso permite uma rápida mudança da ordem de ajuste do equipamento em eventualidades como manobra de alimentadores ou manutenção de disjuntores.

Para a integração entre os relés junto aos sistemas de monitoramento remoto, SCADA, será utilizado o processador de comunicação SEL – 2032. Este permite que o sistema de controle Unificado da companhia observe os parâmetros do relé de forma remota. O equipamento em questão faz a conexão entre os disjuntores e o modem de internet. Na figura 17 observa –se o SEL-2032.



Figura 21: Processador de comunicação SEL – 2032

Fonte: SCHWITZER (2014,b)

Além disto será utilizado na instalação o sincronizador SEL – 2407, este tem a função de sincronizar, não só os relés da subestação , mas de todo o sistema SCADA, permitindo a sincronização entre o monitoramento de eventos. Na Figura 18, observa –se o equipamento.





Figura 22: Sincronizador SEL – 2407

Fonte: SCHWITZER (2014,e)

Uma representação desta conexão pode ser observada na figura 19

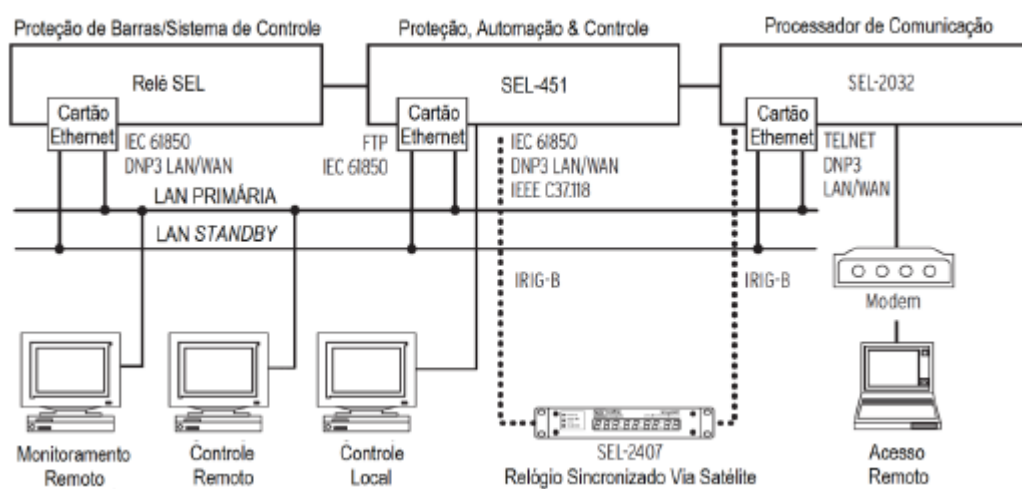


Figura 23: Conexão entre equipamentos

Fonte: SCHWITZER, (2014,f)

## Capítulo 7: Parametrização do relé SEL - 451

Para a parametrização do relé SEL – 451, deve –se realizar o download do software AcSELerator, fornecido pelo fabricante do equipamento em, <http://www.selinc.com.br/Produtos/SEL-5030-AcSELerator.aspx>

No processo de download do software, são solicitados códigos que se encontram fixados a estrutura do equipamento, assim, para o seu download é necessário que se possua um relé da marca do fabricante.

Ao se realizar o download do software, depara –se com a janela que pode ser observada na Figura 20. Neste momento, deve – se selecionar o relé SEL – 451, e iniciar um novo projeto.

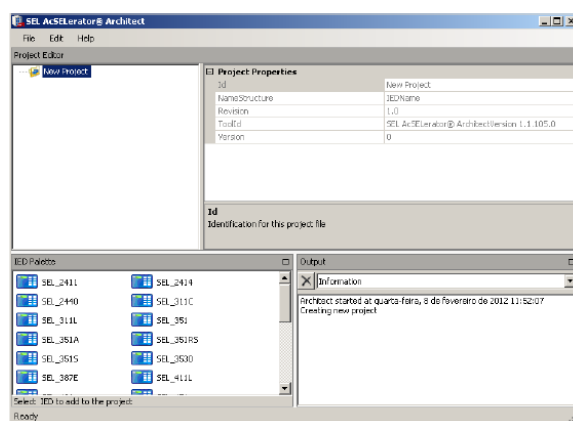


Figura 24: Janela inicial do software

Fonte: SCHWITZER, (2014,a)

Após a abertura deste novo projeto abre –se os grupos de ajustes do relé que podem ser observados na Figura 21. Ao se alterar o grupo de ajustes no canto esquerdo da tela alteram – se os ajustes presentes no canto direito da mesma.

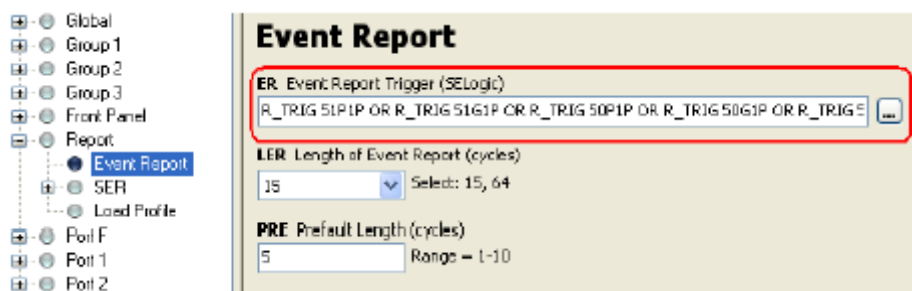


Figura 25: Ajustes internos ao software do relé

Fonte: Cardoso (2014)

Ao observar todos os ajustes possíveis varrendo – se todos os grupos selecionáveis, nota –se a existência de mais de 1000 ajustes em todo o relé.

Os Ajustes mais relevantes para a aplicação estudada e as opções tomadas foram:

**RID** = SUBESTAÇÃO01. Este ajuste tem a função de informar o grupo de relés o qual este relé pertence, normalmente, utiliza-se a subestação na qual ele está inserido.

**SID** = ALIMENTADOR1. Este ajuste informa qual é este relé entre os relés do grupo informado pelo comando RID, normalmente escolhe-se o equipamento que está sendo protegido por este relé.

**NUNBK** =1, este ajuste define o número de disjuntores que serão comandados pelo relé, este relé tem a possibilidade de comandar até 2 disjuntores o que é muito útil quando a subestação apresenta o barramento na configuração disjuntor e meio, no estudo de caso foi selecionado 1 disjuntor por relé.

**DC1HWP** = 126, este ajuste define o nível de tensão de alimentação a partir do qual será enviado o alarme de subtensão do banco de baterias.

**DC1HWP** = 138, este ajuste define o nível de tensão a partir do qual será enviada uma mensagem de sobretenção do banco de baterias.

**DC1RP** = 12, este ajuste define a amplitude máxima da oscilação de tensão tolerada pelo alarme no banco de baterias.

**DC1GF** = 1,05 , este ajuste é empregado para bancos de bateria de terminal central aterrados, esta função compara a relação entre a amplitude do nível de tensão positiva com relação a terra, e a amplitude de tensão do nível negativa e a terra, caso essa relação ultrapasse 1,05 conclui –se que está havendo uma falta entre um dos terminais da bateria e a terra, soando – se um alarme.

**SS1**= PB4 AND NOT SG1, este ajuste define a condição para a alteração do grupo de ajustes do relé , na configuração escolhida a primeira ordem de ajuste é selecionada caso ainda não tenha sido escolhida e o botão 4 do relé tenha sido pressionado por mais de 3 segundos.

**E61850** = Y, este ajuste define será utilizado o protocolo de comunicação IEC 61850, como , esta foi a opção neste estudo de caso selecionou – se Y.

**TR** = 50P2 OR 51S1T OR 51G, este ajuste define as condições para o envio do sinal de abertura do disjuntor, na configuração escolhida, este sinal será enviado caso sejam sensibilizados os elementos de sobrecorrente instantâneo, sobrecorrente temporizado ou o elementos temporizado de falta a terra.

**CTRW**=600, este ajuste informa ao relé a relação dos transformadores de corrente utilizados.

**PTRY** = 115 , este ajuste informa a relação de transformação dos transformadores de potencial

**51S1C** = C5 , estes ajuste define a curva IEC utilizada pelo elemento de sobrecorrente temporizado, para o alimentador em questão foi escolhida a curva C5.

**50P1P** = 10 , este ajuste define a atuação da corrente de atuação do elemento de sobrecorrente instantâneo, foram mantidas as configurações iniciais da subestação.

**51S1P** = 0.805 , este ajuste define a corrente de sensibilização do elemento de sobrecorrente temporizado, na escolha desta corrente deve –se considerar a relação dos transformadores de corrente.

Com o fim da seleção de parâmetros do equipamento, conecta- se o relé ao computador utilizado, e seleciona –se os campos File / Send , do programa enviando os parâmetros para a memória do relé.

## **Capítulo 8: Considerações financeiras e operacionais do processo de substituição**

Ao se observar as vantagens descritas no capítulo 4 deste trabalho, ficam evidentes as vantagens operativas de uma subestação protegida por relés digitais, quando comparada a outra subestação protegida por relés eletromecânicos.

No entanto, ainda existem muitas subestações ainda protegidas pela tecnologia eletromecânica, este capítulo tem o objetivo de pontuar os motivos da persistência no modelo tradicional.

Um motivo inicial para esta permanência, é o fato da tecnologia eletromecânica, ainda atender os requisitos básicos de proteção, e já ter seu custo de instalação totalmente amortizado ao longo dos anos. Já a implantação de relés digitais trariam novos custos de aquisição de equipamentos, adequação de sala de operação, e instalação dos equipamentos instalados.

Outro motivo seria a necessidade de uma reforma do sistema de proteção da subestação. Tais reformas, normalmente são realizadas desligando – se totalmente a subestação original, Neste processo trás – se uma subestação móvel montada sobre a estrutura de uma carreta , e esta assume a carga da subestação. Este recurso é bastante escasso entre as distribuidoras de energia, além de complicações indiretas ao processo como o custo do transporte da subestação móvel e a necessidade de construção de bays provisórios para a instalação da mesma.

E por fim tem – se a necessidade de adequação do corpo técnico existente a nova tecnologia. Esta adequação tem desafios didáticos, por se tratar de uma tecnologia muito diferente da eletromecânica, custos financeiros a serem gastos com viagens, alimentação e estadias em hotéis, e desafios operacionais, pois durante o período de treinamento deste técnico ele não estará exercendo suas funções normais de trabalho, reduzindo assim a capacidade de execução de sua equipe.

No entanto, mesmo com estes desafios nota –se um processo de troca dos equipamentos antigos , por digitais nas subestações de distribuição de energia elétrica.

## **Capítulo9: Conclusão**

Neste trabalho é apresentada uma avaliação a respeito da substituição de relés eletromecânicos por reles digitais. Essa substituição é desejável não por uma incapacidade dos relés eletromecânicos de garantirem uma confiabilidade e seletividade necessária, mas pela grande gama de vantagens apresentadas pelos relés digitais.

Neste cenário destacam - se vantagens como: adaptabilidade, menor necessidade de manutenção, aquisição de dados, processamento dos dados adquiridos, entre muitas outras.

Portanto pode-se dizer que este trabalho contribui na medida em que estimula o setor elétrico para adoção de modernas tecnologias para a proteção dos sistemas elétricos, que, com o passar dos anos, vem se tornando cada vez mais complexo e sensível a fontes de anomalias. E essa modernização vem com o intuito de aumentar a robustez e a eficiência das concessionárias no sentido do fornecimento de energia elétrica.

## Referências Bibliográficas

CAMINHA, Amadeu Casal. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. E. Blucher, 1977.

CARDOSO, Ricardo , **Guia prático para a Configuração, coleta e utilização de oscilografias em relé digitais**, SCHWITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMECIAL. LTD, Disponível em : <[www.selink.com.br](http://www.selink.com.br)> Acesso em 5 junho 2014, 09:00

ELMORE, Walter A. **Protective Relaying: Theory and Applications**. CRC Press, 2003.

OH, Jaehoon; ROH, Jaekeun; YANG, Hangjun. The Development of Bay Control Unit with flexible IO module. In: **Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on**. IEEE, 2011. p. 1110-1114.

PRODIST, Procedimento de distribuição, Módulo 8—Qualidade da Energia Elétrica. **Agência Nacional de Energia Elétrica—ANEEL**., 2010.

ROSEN, Donn L. et al. Do You Want to Put all Your" Relay Eggs" in One Basket?. In: **ANNUAL PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE**. IEEE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS, 1998. p. 195-206.

SCHWITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMECIAL. LTD , **Guia prático para instalação e utilização do Software SEL-5032 AcSELeRator® Architect** , Disponível em <[www.selink.com.br](http://www.selink.com.br)> . Acesso em 5 junho 2014a, 14:00

SCHWITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMECIAL. LTD , **Information Processors, SEL-2032 Communications Processor**, Disponível em : <[http://plcsystems.ru/catalog/Relay\\_protection/doc/SEL-2032\\_spec\\_eng.pdf](http://plcsystems.ru/catalog/Relay_protection/doc/SEL-2032_spec_eng.pdf)>, Acesso em 1 dezembro 2014b, 11:30

SCHWITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMECIAL. LTD ,**Memória de cálculo para os ajustes do relé de proteção, automação e controle – SEL-451** , Disponível em <[www.selink.com.br](http://www.selink.com.br)> . Acesso em 5 junho 2014c, 12:40

SCHWITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMECIAL. LTD ,**Memória de cálculo para os ajustes do relé de proteção de alimentador – SEL-751** , Disponível em :<[www.selink.com.br](http://www.selink.com.br)>, Acesso em 26 novembro 2014d,15:00

SCHWITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMECIAL. LTD , **SEL-2407® Satellite-Synchronized Clock** , Disponível em < <https://www.selinc.com/SEL-2407/>> . Acesso em 1 dezembro 2014e, 12:00

SCHWITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMECIAL. LTD ,**Sistemas de automação proteção e controle – SEL - 451** , Disponível em <[www.selink.com.br](http://www.selink.com.br)> . Acesso em 5 junho 2014f, 9:40

SOUZA, B. A. et al. Evolution of oscillograph-How did Chesf transform data into information?. **Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)**, v. 8, n. 1, p. 45-50, 2010.