

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JOÃO MARCOS FARNETANE BLOTTA

**ESTUDO E ANÁLISE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO EM
SUBESTAÇÕES AUTOMATIZADAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

Guaratinguetá
2011

JOÃO MARCOS FARNETANE BLOTTA

**ESTUDO E ANÁLISE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO EM SUBESTAÇÕES
AUTOMATIZADAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

Guaratinguetá
2011

B656e Blotta, João Marcos Farnetane
Estudo e análise dos sistemas de proteção em subestações automatizadas de energia elétrica / João Marcos Farnetane Blotta. – Guaratinguetá : [s.n], 2011
58 f. : il.
Bibliografia : f. 55-56

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011
Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

1. Sistemas de energia elétrica - Proteção I. Título.

CDU 621.316

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

ESTUDO E ANÁLISE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO EM SUBESTAÇÕES AUTOMATIZADAS DE
ENERGIA ELÉTRICA


JOÃO MARCOS FARNETANE BLOTTA

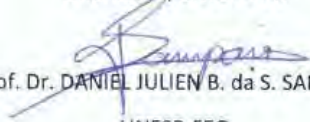
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **GRADUADO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Samuel Euzedice de Lucena
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. DANIEL JULIEN B. da S. SAMPAIO
UNESP-FEG


Prof. Dr. DURVAL LUIZ SILVA RICCIULLI
UNESP/FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

JOÃO MARCOS FARNETANE BLOTTA

| | |
|------------|---|
| NASCIMENTO | 12.07.1988 – SÃO JOÃO DA BOA VISTA / SP |
| FILIAÇÃO | Marcos Vasconcellos Blotta Lucila Lourenço Farnetane Blotta |
| 2007/2011 | Curso de Graduação Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá |

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcos e Lucila, à minha irmã Fernanda e, de modo especial, à minha filha Maria Eduarda, que com os seus dois anos de vida, foi a grande incentivadora para que eu continuasse no curso, e à minha noiva Mariana.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Marcos e Lucila*, que sempre me deram força e apoio em todas as decisões.

À minha noiva *Mariana* e minha filha *Maria Eduarda*, que sempre me deram incentivo, força e confiança para vencer todas os problemas.

Ao meu gestor *Carlos Alberto Carcelli* e todos os companheiros da área de ofertas de subestações de alta tensão (*Cepeda, Evandro, Edgar, Aline, João e Murillo*) que, durante meu período de estágio, sempre me explicaram as dúvidas existentes, ajudando para o meu conhecimento.

à república *Toa-Toa*, onde fiz amigos que levarei para o resto da vida

à *Dona Ana*, que trabalhou na república desde o começo da minha estadia em Guaratinguetá, sempre nos tratando como se fossemos filhos mesmo.

Aos amigos pessoais que tenho de São João da Boa Vista, os quais levarei para a vida toda também.

EPÍGRAFE

“A filosofia do NÃO POSSO tem sido
a causa principal de muitas ruínas.
A confiança é a chave mágica que abre
as portas do êxito e da felicidade.”

Orison Swett **Marden**

BLOTTA, J. M. F. Estudo e Análise dos Sistemas de Proteção em Subestações Automatizadas de Energia Elétrica. – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

A energia elétrica está presente na vida de todas as pessoas e é de extrema importância que a mesma seja entregue aos consumidores finais com bastante qualidade, segurança e baixos custos associados. As subestações de energia elétrica são as responsáveis pela transmissão e distribuição da eletricidade das fontes geradoras até os consumidores e, com os avanços tecnológicos e a consequente automatização das mesmas, a energia elétrica passou a ser entregue com uma maior continuidade e confiabilidade. Os sistemas de proteção nas subestações são os grandes responsáveis por fazer com que a energia elétrica chegue aos consumidores finais com qualidade, já que sua função é impedir a propagação de qualquer tipo de falha ocorrida em qualquer ponto da transmissão até os centros de carga. Esses sistemas são constituídos, basicamente, pelos transformadores de corrente e de potencial, pelos relés de proteção e pelos disjuntores e chaves seccionadoras. Os transformadores enviam os dados necessários aos relés e, caso esses detectem alguma anormalidade no sistema, atuam o comando de abertura dos disjuntores para isolar a ramificação onde se encontra a falta. Portanto, torna-se fundamental entender melhor o funcionamento desses equipamentos, assim como do sistema em geral. Este trabalho tem como objetivo estudar os principais equipamentos de uma subestação, os transformadores de corrente e de potencial e, principalmente, os relés de proteção, a fim de se obter as vantagens que a automatização dos sistemas podem proporcionar.

PALAVRAS-CHAVE: Energia elétrica; subestação de energia elétrica; sistemas de proteção; relés.

BLOTTA, J. M. F. Study and Analysis of Protection Systems Automated Electric Power Substations. - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

Electrical energy is present in the lives of all people and is extremely important that it be delivered to end users with plenty of quality, safety and low costs. The electric power substations are responsible for transmission and distribution of electricity generating sources to consumers, and with technological advances and the subsequent automation of same, the electricity began to be delivered with greater continuity and reliability. Protection systems in substations are largely responsible for making the electricity reaches the final consumer with quality, since their function is to prevent the spread of any type of failure occurred at any point of transmission to the load centers. These systems consist primarily by the current transformers and potential, by the protective relays and circuit breakers and switchgear. The processors send the necessary data to the relays and, if those detect any abnormality in the system, operate the opening command of the branch circuit breakers to isolate where the fault. Therefore, it is essential to better understand the operation of such equipment, as well as the overall system. This work aims to study the main substation equipment, current transformers and potential and, especially, protection relays, in order to obtain the advantages that automated systems can provide.

KEYWORDS: Electricity; electric power substation; protection systems; relays.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1: Arranjo Disjuntor e Meio utilizado em subestações..... | 21 |
| Figura 2: Arranjo com barra principal e barra de transferência..... | 23 |
| Figura 3: Arranjo Barra dupla 4 Chaves..... | 24 |
| Figura 4: Pára-raios de ZnO | 26 |
| Figura 5: Chave Seccionadora | 27 |
| Figura 6: Disjuntor isolado a gás SF₆..... | 29 |
| Figura 7: Esquema Geral de um TC..... | 30 |
| Figura 8: Esquema Geral de um TP | 31 |
| Figura 9: Transformador principal..... | 32 |
| Figura 10: Principais componentes de um relé eletromecânico de corrente..... | 36 |
| Figura 11: Funcionamento do Relé Digital | 37 |
| Figura 12: Ocorrência de falha na carga ligada ao Disj. 4 | 39 |
| Figura 13: Falha no Disj. A e atuação do Relé R2..... | 40 |
| Figura 14: SIPROTEC 4 7SJ64..... | 42 |
| Figura 15: Diagrama de Função 7SJ64 (<i>SIPROTEC NUMERICAL PROTECTION RELAYS</i>)..... | 43 |
| Figura 16: SIPROTEC 4 7UT6 | 45 |
| Figura 17: Diagrama de Função 7UT6 (<i>SIPROTEC NUMERICAL PROTECTION RELAYS</i>)..... | 46 |
| Figura 18: Diagrama unifilar simplificado da SE Castanhal..... | 48 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Histórico | 15 |
| 1.2 Estrutura do Trabalho | 18 |
| 2. SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA | 19 |
| 2.1 Subestações Transformadoras | 20 |
| 2.1.1 Subestações transformadoras elevadoras | 20 |
| 2.1.2 Subestações transformadoras abaixadoras | 22 |
| 2.2 Subestação de Manobra, Seccionadora ou de Chaveamento | 23 |
| 2.3 Subestação Externa ou ao tempo | 24 |
| 2.4 Subestação Interna ou Abrigada..... | 24 |
| 2.5 Equipamentos de uma Subestação | 25 |
| 2.5.1 Pára-raios | 25 |
| 2.5.2 Chaves seccionadoras | 26 |
| 2.5.3 Disjuntores..... | 28 |
| 2.5.4 Transformadores de corrente | 29 |
| 2.5.5 Transformadores de potencial..... | 30 |
| 2.5.6 Transformadores de força..... | 31 |
| 3. SISTEMAS DE PROTEÇÃO EM SUBESTAÇÕES | 33 |
| 3.1 Norma IEC 61850 | 34 |
| 3.2 Relé de proteção..... | 34 |
| 3.2.1 Relés eletromecânicos | 35 |
| 3.2.2 Relés eletrônicos | 36 |
| 3.2.3 Relés Digitais | 37 |
| 3.3 Coordenação e seletividade do sistema de proteção | 38 |
| 3.4 Termos técnicos referentes a relés e sistemas de proteção..... | 40 |
| 4. RELÉS DIGITAIS | 41 |
| 4.1 Relé de proteção multifuncional com sincronização - SIPROTEC 4 7SJ64 | 41 |
| 4.2 Relé de proteção diferencial para Transformadores, Geradores e Barramentos - SIPROTEC 4 7UT6 | 44 |
| 5. ESTUDO DE CASO | 48 |
| 5.1 Esquema de proteção | 48 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 5.1.1 | Relés utilizados | 49 |
| 5.2 | Considerações quanto ao desempenho dos TC's | 50 |
| 6. | CONCLUSÃO | 53 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |
| | ANEXO A..... | 57 |

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE), em especial os Sistemas Elétricos de Potência (SEP), são construídos com a finalidade de fornecer energia elétrica aos consumidores (indústrias, residências, hospitais, escolas, iluminação pública, comércio etc.).

Atualmente, os SEP constituem sistemas grandes e complexos, interligados e com dimensões nacionais, tornando sua operação uma tarefa cada vez mais complexa.

Encontrar fontes geradoras de energia limpa e equacionar o crescimento desta demanda não são os únicos desafios vividos pela sociedade nos dias de hoje.

O que foi projetado para atender a uma realidade do século XX, seguramente não conseguirá acompanhar satisfatoriamente as tendências de demanda do século XXI, onde o consumo de energia elétrica insiste em crescer a taxas sempre mais elevadas que o próprio PIB dos países.

Contudo, é premissa básica para a concepção dos sistemas elétricos que a energia elétrica chegue aos usuários finais com qualidade, segurança, integridade e menores custos associados.

Trata-se, portanto, de um grande desafio. Especialistas do mundo todo vêm discutindo a fragilidade da infraestrutura de energia elétrica e o custo que interrupções na rede representam, não só para as concessionárias e consumidores, mas sobretudo para a economia como um todo. Falhas na rede elétrica em efeito dominó podem trazer prejuízos incalculáveis - fatos como o ocorrido em 1999, onde 75 milhões de brasileiros ficaram por quatro horas sem energia, fornecem a dimensão exata do desafio que se tem pela frente¹. Os anos de 2005 e 2007 também foram marcados por uma falta de energia elétrica em âmbito nacional.

As subestações de energia elétrica fazem parte da arquitetura que é responsável por realizar a transmissão e distribuição da energia até os consumidores finais. Atualmente, são compostas por equipamentos que possuem comandos automáticos, principalmente o sistema de proteção, formando assim, as subestações automatizadas de energia.

¹ O blecaute marcou os últimos anos do governo FHC, teve início às 22h16 na subestação de Bauri, interior de São Paulo. A falta de energia elétrica afetou dez Estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.

Sistemas de proteção são sistemas aos quais estão associados todos os dispositivos necessários para detectar, localizar e comandar a eliminação de um curto-circuito ou uma condição anormal de operação de um sistema elétrico, protegendo os equipamentos, reduzindo o tempo de indisponibilidade de energia e o custo de reparo, devido ao fato da isolação ser feita somente no ramo onde ocorreu tal falta.

Princípios de sensibilidade, seletividade, coordenação, segurança, confiabilidade e velocidade na atuação devem sempre ser atendidos e, quanto melhor isso ocorrer, mais eficaz é o sistema de proteção.

Segundo Caminha (1977), a principal função de um sistema de proteção é a de retirar rapidamente de operação qualquer elemento de um sistema quando ele sofre um curto-circuito, ou quando um equipamento estiver operando sob condições anormais que possam causar dano ou interferir na operação normal do sistema. Outra atribuição do sistema de proteção é indicar a localização e o tipo da falta, facilitando o reparo.

O dispositivo elétrico que sente a anormalidade no sistema e comanda a retirada do elemento defeituoso é o relé. São os elementos mais importantes do sistema de proteção, uma vez que estes equipamentos são capazes de identificar os defeitos, alertar a quem opera o sistema e promover a abertura de disjuntores de modo a isolar a falha.

Os relés de proteção contra falta permitem distinguir logicamente a diferença entre correntes de curtos-circuitos e de carga normal e, em alguns casos, distinguir diferentes locais de falta.

Os três indicadores que fornecem as informações necessárias que permitem distinguir entre as correntes de carga e de curto-circuito são: a) tensão, b) corrente e c) ângulo entre a corrente e a tensão.

As correntes de curto-circuito são geralmente maiores que as correntes de carga; as tensões do sistema durante o curto-circuito são menores que as normais, e o ângulo de atraso da corrente em relação à tensão é em geral maior para correntes de curto-circuito do que para corrente normal. Por essa razão, os relés de proteção contra falta usam a tensão e a corrente como grandezas características de entrada.

Ocorrendo uma anomalia no sistema, de modo que o parâmetro sensível do relé ultrapasse o seu ajuste, o mesmo atua.

De modo geral, a atuação de um sistema de proteção ocorre em três níveis, que são conhecidos como: proteção principal (ou primária), de retaguarda e auxiliar. A proteção principal é aquela que deverá atuar primeiro, enquanto que a proteção de

retaguarda se encarregará da proteção no caso da proteção primária falhar. A proteção auxiliar fica localizada na própria subestação e só é colocada em operação caso haja uma falha na proteção principal.

É comum que a proteção de retaguarda fique localizada em uma subestação diferente de onde está instalada a proteção principal.

Duas regras básicas devem ser observadas pelos equipamentos de proteção: se não há defeito, a proteção não deve atuar, uma vez que desligamentos desnecessários podem ser piores que a falha de atuação, e caso haja defeito na zona de controle do relé, os procedimentos devem ser precisos.

Dessa forma, ao melhorar a continuidade do serviço, um sistema de proteção melhora, conseqüentemente, os indicadores de continuidade estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), junto às concessionárias de energia elétrica. Estes índices são conhecidos como: DIC – Duração de Interrupção por Unidade Consumidora, FIC – Frequência de interrupção por Unidade Consumidora, DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade, FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por unidade Consumidora e DMIC – Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora.

Benefícios como eficiência, confiabilidade, integração de ponta, são motivos que elevam, e muito, a importância de um estudo aprofundado sobre os sistemas de proteção nas subestações do Sistema Elétrico Brasileiro, objetivo deste trabalho.

1.1 Histórico

Cem anos não são nada se comparados com o tempo em que o homem vem vagando pela Terra. Em termos de tecnologia, entretanto, é uma eternidade. Ninguém imaginava que uma subestação típica de aproximadamente 100 anos atrás, uma das primeiras que foram construídas, seria como é hoje. Até então, os equipamentos utilizados eram volumosos e complicados, exigindo uma supervisão constante e manutenção frequente.

Grande parte do século XX foi focada no desenvolvimento de novas tecnologias a fim de ampliar a capacidade, disponibilidade e diminuir a manutenção dos equipamentos, para que fossem solucionados problemas de tamanho, velocidade e automação nas subestações.

Alguns desses desenvolvimentos e inovações levaram ao lançamento, nos anos 1960, do painel de manobra isolado a gás. Esses painéis, menores e mais compactos, reduziram as dimensões de uma subestação convencional com isolamento a ar em quase 90% (Hans, 2009).

A expansão, o aumento da complexidade e a mudança das características das cargas no SEP causam um aumento da necessidade de um sistema de proteção cada vez mais confiável e seguro, o que se reflete no acréscimo de velocidade e de sofisticadas características dos relés de proteção.

Com o desenvolvimento dos componentes semicondutores, iniciou-se o projeto de relés de proteção mais rápidos que, ao contrário dos eletromecânicos, utilizam componentes discretos ou integrados, ficando conhecido como relés de estado sólido ou estáticos, substituindo, nos anos 1970, os relés eletromecânicos.

Além do aumento da velocidade de resposta, a implantação destes novos equipamentos eletrônicos permitiu diminuir o espaço físico das cabines de proteção nas subestações, aumentar a flexibilidade na proteção e a mudança das características pelo ajuste dos elementos lógicos.

Porém, estes dispositivos apresentavam alguns problemas em relação ao ambiente de instalação, pois apresentavam uma limitação quanto à temperatura e umidade do mesmo e também necessitava de uma fonte externa que pudesse suprir o fornecimento de energia, sendo necessário instalar sistemas de alimentação adicionais.

Com a crescente evolução tecnológica e a utilização de microprocessadores, os relés de proteção sofreram uma grande evolução, tanto nos aspectos construtivos quanto na sua concepção de funcionamento, o que possibilitou um aumento considerável no desempenho e na confiabilidade dos sistemas de proteção.

Os relés microprocessados ou numéricos, assim como os eletromecânicos, usam correntes e tensões provenientes do SEP como sinais de entrada. Porém, necessitam da representação digital dos mesmos, sendo preciso que os sinais analógicos sejam amostrados e condicionados para o início do funcionamento do relé.

Nessa nova geração de equipamentos, diferentemente das antecessoras, a decisão de abertura do disjuntor (*trip*) é definida pelo resultado de operações matemáticas, o que possibilita a integração de várias funções em um único equipamento e também apresentam algumas vantagens, tais como:

- Auto-checagem e confiabilidade: o relé computadorizado pode ser programado para monitorar continuamente os subsistemas de *hardware* e *software*, de modo a detectar possíveis falhas na operação e o consequente disparo de alertas.
- Integração de sistemas: os sistemas digitais possibilitam uma maior integração entre seus componentes, permitindo uma maior flexibilidade e velocidade na obtenção das informações registradas pelos equipamentos, além da possibilidade de troca de informações entre os dispositivos para a melhor tomada de decisão, por exemplo, a coordenação lógica.
- Flexibilidade funcional e adaptabilidade: possivelmente uma das principais características dos relés modernos é a capacidade de alteração dos seus parâmetros de configuração de acordo com a topologia da rede, ou seja, se o relé está programado para uma determinada característica de operação do sistema elétrico e esta sofre uma alteração, o relé tem a capacidade de identificar o tipo de mudança realizada e adotar parâmetros que melhor se adaptem a esta nova situação.
- Custo benefício: apesar do custo ser mais alto do que os relés eletromecânicos, as vantagens que se tem com a utilização dos relés numéricos superam qualquer desvantagem, apresentando um melhor custo benefício.

Os avanços tecnológicos permitem às concessionárias de energia a operação e controle remotos das subestações, sem a necessidade de uma pessoa no local. Subestações pré-projetadas, pré-fabricadas e modulares estão disponíveis em diversas configurações, AIS (subestações isoladas a ar) e GIS (subestações isoladas a gás), permitindo prazos de entrega curtos e uma alta qualidade de instalação.

Sendo assim, subestações de energia responsáveis pela alimentação elétrica de todo um parque industrial passam a ser automatizadas e operadas, remotamente, de uma maneira inimaginável há poucos anos atrás.

A modernização das subestações implicou na melhoria do desempenho do sistema elétrico como um todo através da substituição dos equipamentos obsoletos, como os relés eletromecânicos para relés multifunção microprocessados. A monitoração de grandezas elétrica detalhadas foi possibilitada com a instalação de um sistema de supervisão e controle, viabilizando a supervisão em tempo real do status de cada dispositivo e da detecção da fonte e da causa de falhas.

1.2 Estrutura do Trabalho

Neste capítulo é visto uma breve introdução, sendo mostrado o desenvolvimento histórico sofrido pelas subestações e pelos relés de proteção, destacando algumas vantagens e desvantagens existentes entre eles e, principalmente, mostrada a real necessidade de um estudo aprofundado sobre este tema.

No capítulo 2 é introduzida uma breve explicação sobre os tipos de subestações existentes, assim como dos principais equipamentos que são utilizados, destacando os transformadores de corrente e de potencial, os quais são fundamentais para o bom funcionamento do sistema de proteção.

O capítulo 3 aborda o tema de automação de subestações, comentando a Norma IEC61850, discutindo os principais tipos de relés de proteção, bem como o princípio de funcionamento de cada um deles.

No capítulo 4 é mostrado dois tipos de relés de proteção, sendo mostradas as principais características e as respectivas funções de proteção destes relés.

O capítulo 5 aborda um estudo de caso, analisando os relés de proteção que foram utilizados na ampliação da SE Castanhal, subestação de seccionamento de linha localizada no município de Belém – PA.

E no capítulo 6 é feita a conclusão do trabalho, analisando o mesmo como um todo, justificando os constantes estudos sobre o tema.

2 SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA

Subestações contêm equipamentos com funções de transmissão, distribuição, proteção e controle de energia elétrica, sendo crucial para o bom funcionamento de um sistema elétrico.

Uma Subestação (SE) é um conjunto de equipamentos de manobra e/ou transformação e ainda, eventualmente, de compensação de reativos usado para dirigir o fluxo de energia em sistema de potência e possibilitar a sua diversificação através de rotas alternativas, possuindo dispositivos de proteção capazes de detectar os diferentes tipos de faltas que ocorrem no sistema e de isolar os trechos onde estas faltas ocorrem (Dualibe, 1999).

Uma SE funciona como ponto de controle e transferência durante todas as etapas de transmissão, sendo responsáveis por organizar o fluxo energético da rede, transformando os níveis de tensão e protegendo tanto cargas quanto alimentadores.

Durante o percurso entre as usinas e as cidades a energia elétrica passa por diversas subestações, onde os níveis de tensão são elevados ou reduzidos, a fim de se obter a tensão nominal referente à aplicação desejada.

O objetivo da elevação da energia elétrica no início do processo da transmissão² se deve à necessidade de evitar perdas excessivas ao longo do caminho e menores custos dos cabos, justificado pela diminuição da bitola. Já ao rebaixar a tensão elétrica perto dos centros urbanos, permitem a distribuição³ da energia por toda a cidade.

Mesmo com a diminuição da tensão em nível de distribuição, a mesma ainda não se encontra adequada para os consumidores residenciais, sendo necessária a instalação de outros transformadores menores, a fim de reduzir ainda mais a tensão para que esta possa ir diretamente às residências, comércios e outros locais de consumo, normalmente em 220V ou 110V.

O fornecimento de energia elétrica no Brasil é feito por meio de um grande e complexo sistema de subestações e linhas de transmissão, interligadas às várias usinas de diversas empresas. Assim, uma cidade não recebe energia de uma única usina, mas

² É considerada transmissão de energia elétrica quando se tem tensões maiores ou iguais a 230kV.

³ Para a distribuição, o nível de tensão varia de 1kV até 230kV.

sim de diversas usinas hidrelétricas, termelétricas, nucleares e outras, formando o Sistema Interligado Nacional (SIN).

E, por causa disso, subestações de energia elétrica, atuando tanto na fase de Geração, Transmissão ou Distribuição de energia, formam uma importante área da engenharia elétrica atualmente. Isso ocorre porque são partes integrantes do sistema responsável por realizar o transporte da eletricidade das unidades geradoras até os centros consumidores em geral.

Uma subestação pode ser classificada quanto a sua função ou quanto a sua instalação. Quanto à função, podem existir subestações transformadoras ou subestações de manobra (também conhecidas como SE seccionadora ou de chaveamento), e quanto à maneira de instalação, podem ser externas (ao tempo) ou internas (abrigadas).

2.1 Subestações Transformadoras

São responsáveis por transformar o nível de tensão da linha, podendo ser divididas em subestações elevadoras de tensão e abaixadoras.

2.1.1 Subestações transformadoras elevadoras

As subestações transformadoras elevadoras são as responsáveis por realizar a elevação do nível de tensão da energia elétrica a ser transportada. Normalmente são utilizadas próximas aos centros geradores de eletricidade, como hidrelétricas, termelétricas, usinas nucleares etc., com o objetivo de diminuir as perdas durante a transmissão de um ponto a outro.

Com o aumento da distância física entre o ponto gerador e o consumidor, existe a necessidade de aumentar cada vez mais os níveis de tensão, para que as perdas não fossem significativas.

O aumento da tensão de transmissão se deve ao fato de que a energia elétrica é transmitida na forma de potência, assim, obedecendo a relação mostrada na equação (1), quanto maior for o valor da tensão, menor é o valor da corrente transmitida, fazendo com que as perdas por dissipação, aumento na temperatura dos condutores e até mesmo a bitola do cabo necessário sejam menores.

$$P = V * I \quad (1)$$

Na Figura 1 a seguir é mostrado um arranjo típico de uma subestação elevadora de tensão.

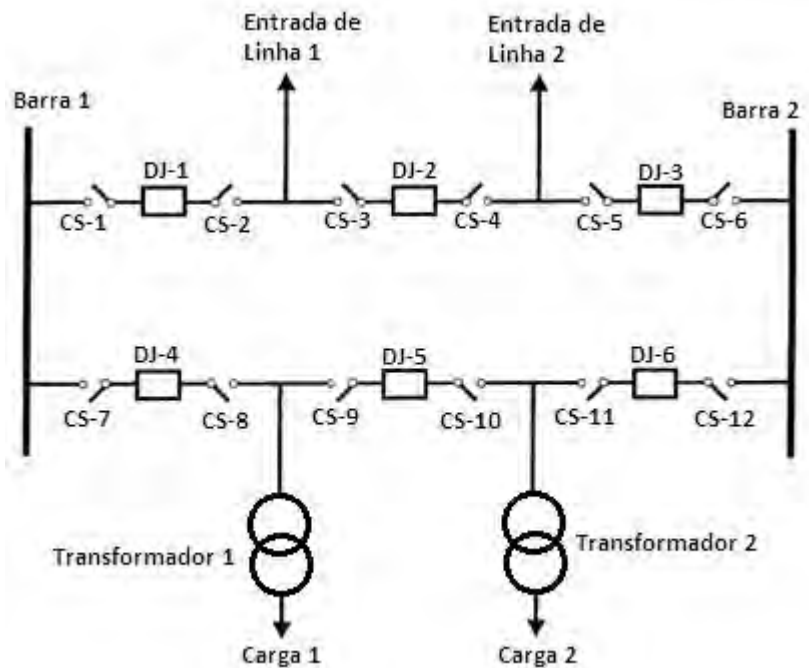


Figura 1: Arranjo Disjuntor e Meio⁴ utilizado em subestações

A confiabilidade dos equipamentos e do sistema de controle e proteção de uma SE elevadora deve ser muito alta, já que é o início da transmissão, e caso haja uma falha, muitos consumidores ficarão sem energia.

O arranjo disjuntor e meio mostrado na figura 1 proporciona uma alta flexibilidade na operação dos equipamentos e, caso haja alguma falha em algum equipamento, há a possibilidade de modificar a ligação, permitindo uma alimentação contínua.

A alimentação da Carga 1, por exemplo, é realizada através da Entrada de Linha 1 com a energia elétrica fluindo pelo disjuntor DJ-1, pela Barra 1 e pelo disjuntor DJ-4, considerando que as chaves seccionadoras CS-1, CS-2, CS-7 e CS-8 estejam fechadas e os disjuntores DJ-2 e DJ-5 abertos.

Em caso de ocorrência de falha de um desses equipamentos por onde flui a energia elétrica, abre-se os disjuntores DJ-1 e DJ-4 e fecha-se os disjuntores DJ-2 e DJ-5, permitindo, assim, a continuidade na alimentação da Carga 1.

⁴ Recebe esse nome pois possui um disjuntor e meio para cada ramal de linha.

Se ocorrer também uma falha no disjuntor DJ-2, por exemplo, a Linha de Entrada 1 fica isolada do sistema e a alimentação da Carga 1 pode ser realizada através da Entrada de Linha 2, mostrando a grande flexibilidade existente.

2.1.2 Subestações transformadoras abaixadoras

Essas subestações abaixam a tensão, que estava no nível de transmissão, para que esta possa ser distribuída para toda a cidade. Normalmente SE's desses tipos ficam localizadas próximas aos centros urbanos e também de centros industriais.

Caso aconteça uma falha em algum dos equipamentos, o número de consumidores que ficariam sem eletricidade seria menor do que no caso de uma subestação elevadora. Porém, os clientes industriais não podem ficar sem energia, já que dependem disso para que seus produtos finais sejam produzidos, como é o caso, por exemplo, de indústrias químicas, que se por acaso um determinado processo é interrompido, toda a mistura é desperdiçada. Assim, a confiabilidade necessária para essas subestações também deve ser alta.

Na Figura 2 pode-se observar um arranjo muito utilizado para as subestações abaixadoras de tensão, principalmente por clientes industriais. Este possibilita uma boa flexibilidade de operação aos clientes e, caso haja uma falha no barramento ou nos disjuntores e seccionadoras, a alimentação da subestação pode ser realizada através da barra de transferência, fazendo com que a interrupção da alimentação seja nula ou por pouco tempo.

Quando se utiliza um arranjo desse tipo, três situações podem acontecer. A situação normal é quando a alimentação da carga é realizada através dos disjuntores DJ-1 e DJ-2, com as chaves seccionadoras CS-1, CS-2, CS-4 e CS-5 estando fechadas. Nesse caso, a Barra de Transferência nem é utilizada.

Na segunda situação, caso ocorra uma falha no disjuntor DJ-2, a energia elétrica irá fluir através do *bay* de transferência pelas chaves CS-7 e CS-8 e pelo disjuntor DJ-3, chegando até Carga através da chave seccionadora CS-6.

A terceira situação é ocorrência de falha no disjuntor DJ-3. Nesse caso, nenhum dos três disjuntores se encontra fechado e a energia chega até a carga através das chaves seccionadoras CS-3 e CS-6. Todas essas situações mostram a flexibilidade alta que um arranjo desse tipo apresenta.

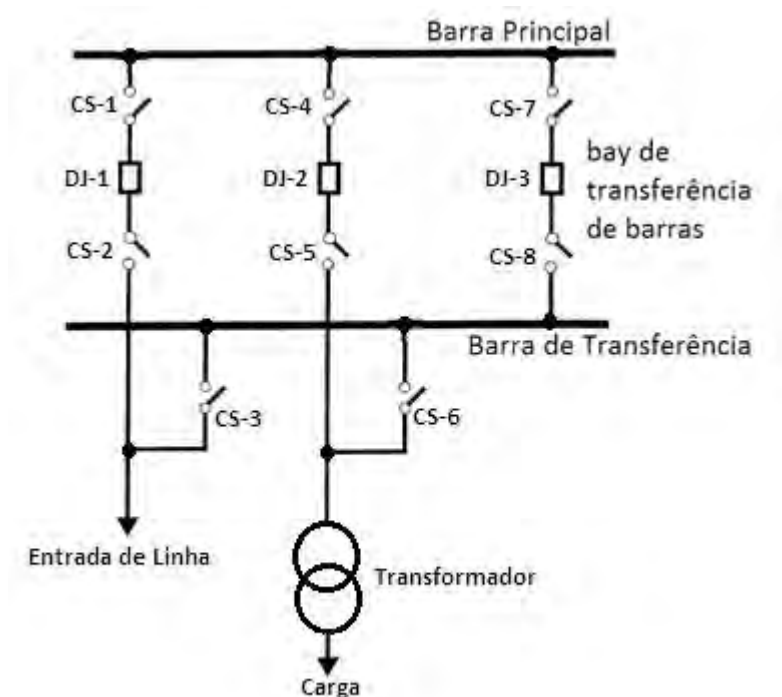


Figura 2: Arranjo com barra principal e barra de transferência

2.2 Subestação de Manobra, Seccionadora ou de Chaveamento

Subestações desse tipo não transformam o nível de tensão, realizam apenas uma manobra no circuito, interligando ou seccionando pontos que possuem a mesma tensão elétrica.

Normalmente, quando se tem uma linha de transmissão muito longa e deseja-se, através dessa, alimentar algum outro ponto, realiza-se o seccionamento do circuito, criando um novo ramal de linha que irá fornecer energia para um novo destino. São bastante usadas pelas concessionárias locais de energia.

A Figura 3 mostra um tipo de arranjo muito utilizado quando se deseja realizar o seccionamento de uma linha, conhecido como barra dupla 4 chaves. Tem esse nome pois são duas barras e cada ramal de linha é formado por 4 chaves seccionadoras dispostas de maneira que se ocorrer falha na barra A, a alimentação pode ser fornecida para a barra B através do bay de transferência formado por CS-5, CS-6 e DJ-2 ou diretamente através da chave CS-4, e caso haja uma falha no disjuntor DJ-1 do ramal, a alimentação continua sendo realizada pela barra B através da chave seccionadora CS-4 que realiza o *by-pass* do disjuntor.

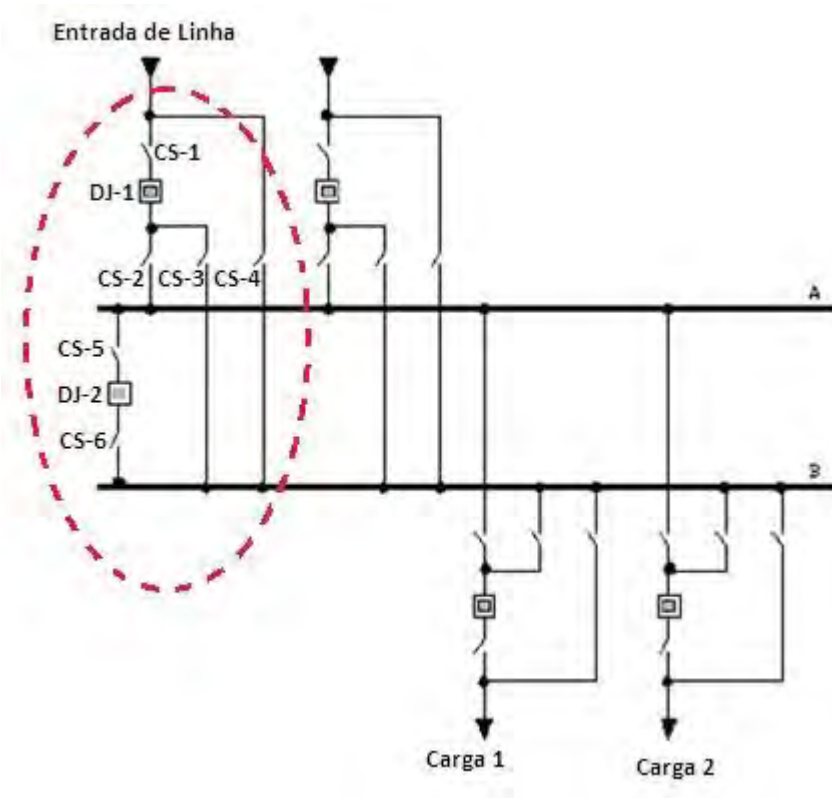


Figura 3: Arranjo Barra dupla 4 Chaves

2.3 Subestação Externa ou ao tempo

Como o próprio nome diz, essas subestações são instaladas ao tempo, ao ar livre, e ficam expostas a condições atmosféricas que podem ser prejudiciais aos equipamentos da SE em geral.

Como consequência, a manutenção dos equipamentos deve ser realizada com uma frequência maior para manter o nível de confiabilidade necessário.

2.4 Subestação Interna ou Abrigada

Nessas subestações, os equipamentos são instalados em abrigos e ficam protegidos contra surtos atmosféricos. Nesse tipo de subestação, são bastante utilizados equipamentos isolados a gás, pois têm seu tamanho reduzido em relação aos isolados a ar, a fim de reduzir também o tamanho da edificação onde será instalada a subestação.

O hexafluoreto de enxofre (SF_6) é o tipo de gás mais utilizado nessas aplicações. Suas características permitem a diminuição no tamanho dos equipamentos, pois

possuem um grau de isolamento maior. A resistividade do gás SF₆ é cerca de 2,5 vezes melhor do que a do ar, quando utilizado na pressão atmosférica normal. Caso o gás seja usado em aplicações com 3 a 5 vezes o valor da pressão do ar, as propriedades do dielétrico chegam a ser 10 vezes melhores do que a do ar.

Assim, através da utilização da isolamento dos equipamentos por meio do gás SF₆, ficam efetivamente extinguidos os arcos elétricos em circuitos de média e alta tensão, proporcionando a segurança necessária ao usuário.

2.5 Equipamentos de uma Subestação

Muitos são os equipamentos utilizados em subestações de energia elétrica e, devido a essa grande variedade, é mostrado aqui os mais importantes e que são indispensáveis para qualquer tipo de SE analisada, como pára-raios, chaves seccionadoras, disjuntores, transformadores de corrente, transformadores de potencial e transformadores de força.

Esses equipamentos possuem alta tecnologia envolvida em seus sistemas, para seu perfeito funcionamento e o da SE como um todo.

Hoje em dia esses equipamentos possuem uma confiabilidade muito alta, que é proporcionada pelas diferentes tecnologias as quais são fabricados, como diferentes meios isolantes, diferentes maneiras de enviar ou receber um comando para abertura, fazendo com que o pacote da SE no total possua uma alta confiabilidade também, requisito muito importante atualmente.

São mostradas as características de cada equipamento no geral, não levando-se em consideração o nível de tensão de aplicação.

2.5.1 Pára-raios

Em subestações, diferentemente do que muitos acreditam, esses equipamentos não são responsáveis por atrair uma descarga atmosférica atuando como inibidores de raios. São responsáveis por conduzir qualquer corrente de fuga diretamente para o terra, já que ficam instalados entre uma fase e o terra.

Atualmente, devido aos avanços tecnológicos, existem 3 tipos de pára-raios, que se diferenciam basicamente pelo tipo de invólucro usado: pára-raios com invólucro de porcelana; pára-raios com invólucro polimérico; pára-raios encapsulados com isolamento SF₆.

Cada um desses três tipos pode ser fabricado ainda em diferentes versões, permitindo que seja utilizado o equipamento mais adequado para cada tipo de função.

Os dois primeiros tipos de pára-raios são formados pelo empilhamento de elementos resistivos não-lineares, conhecidos como varistores, envoltos por um invólucro (polimérico ou porcelana) que garante a estanqueidade, não permitindo, principalmente, a entrada de umidade e poluentes. A configuração do invólucro proporciona uma maior isolação externa, corrente de fuga pequena e a sua utilização ao tempo.

São equipamentos monofásicos, normalmente utilizados logo na entrada da linha, sendo os primeiros equipamentos dentro de uma SE, e também na entrada de transformadores de força, para garantirem que não irá fluir nenhuma corrente de fuga por todo o circuito da SE e em especial do transformador, já que esse é o equipamento mais caro e de maior importância na maioria das subestações.

Na Figura 4 (CR ENERGIA, 2007), pode-se observar uma foto de um pára-raio de Óxido de Zinco.



Figura 4: Pára-raios de ZnO

2.5.2 Chaves seccionadoras

A variedade de chaves seccionadoras é muito maior quando comparada com os outros equipamentos de uma subestação. Os modelos variam de acordo com o tipo de abertura, podendo ter abertura central, lateral, vertical, dupla abertura central, dupla abertura lateral, dupla abertura vertical, semi-pantográfica, entre outras. Cada chave pode ainda ser composta ou não por lâmina de terra e podem ter sua abertura motorizada ou manual, existindo chaves adequadas para cada tipo de uso também.

As que possuem lâmina de terra são normalmente utilizadas na entrada da linha que chega na SE, pois se houver um surto de tensão que não tenha sido percebido pelos pára-raios, a mesma fecha o contato para o terra, protegendo os demais equipamentos. Isso ocorre automaticamente nas chaves motorizadas, permitindo maior velocidade na proteção dos equipamentos.

As chaves seccionadoras motorizadas proporcionam uma maior confiabilidade na proteção e, conseqüentemente, maior segurança aos equipamentos da SE. Porém, apresentam um custo um pouco maior quando comparada com a chave manual.

De qualquer maneira, os benefícios continuam sendo maiores, prevalecendo o uso das chaves motorizadas.

Chaves seccionadoras de alta tensão são formadas por dispositivos de intertravamento que permitem a abertura ou fechamento somente quando o disjuntor se encontrar na posição aberta, aumentando ainda mais a confiabilidade do sistema. São considerados equipamentos de manobra e não de proteção.

A Figura 5 (ADPERC) mostra uma chave seccionadora.



Figura 5: Chave Seccionadora

2.5.3 Disjuntores

Os disjuntores são considerados um dos equipamentos fundamentais das subestações, perdendo em importância somente para os transformadores quando estes estão presentes.

É um dispositivo eletromecânico que funciona como interruptor e, caso haja alguma anormalidade no sistema, o disjuntor é aberto. Sua atuação se dá através de um comando enviado pelo relé responsável pela proteção.

Podem ser automáticos ou manuais, funcionando também como dispositivos de manobra em uma SE.

Seu funcionamento manual é utilizado quando se deseja realizar manutenção em algum equipamento ou no próprio disjuntor. Para o automático, se o relé perceber uma eventual falha, envia o comando de abertura (*trip*) para o disjuntor, e o mesmo se abre automaticamente, com alta velocidade, para que a proteção possa ser realizada com qualidade.

Existem diversos tipos de disjuntores, diferenciando-se um dos outros basicamente pelo tipo de isolamento ao qual o mesmo está sujeito: óleo, ar comprimido, gás SF₆ e vácuo.

Os disjuntores a óleo têm seu princípio de funcionamento baseado na decomposição das moléculas do óleo causada pela temperatura muito elevada do arco elétrico. Essa decomposição origina diversos gases, onde o principal gás formado é o hidrogênio, e, com a liberação desses gases, a temperatura no local é diminuída rapidamente, aumentando-se a pressão em torno do arco, dificultando a propagação do mesmo.

Nos disjuntores com isolamento a ar comprimido, o ar é liberado com bastante pressão e muito rapidamente entre a região dos contatos do disjuntor, fazendo com que ocorra o resfriamento e a compressão do arco.

Disjuntores isolados com SF₆ são os mais usados atualmente. Isso se deve ao fato de que o hexafluoreto de enxofre pode não só ser usado em equipamentos isolados, como pode também realizar a isolamento de uma subestação toda.

Já nos disjuntores a vácuo, o arco que se forma entre os contatos do disjuntor é mantido por íons de material metálico vaporizado, que possuem sua formação

diretamente proporcional ao valor da corrente, diminuindo o plasma quando a corrente se aproxima do zero. Com isso, o intervalo entre os contatos é rapidamente desionizado pela condensação dos vapores metálicos sobre os eletrodos.

Essa ausência de íons após a interrupção da corrente permite a esse tipo de disjuntores características quase que ideais de suportabilidade dielétrica. Porém não é o tipo mais usado atualmente porque o tamanho e peso são maiores que os disjuntores isolados a SF₆.

Na Figura 6 (Eletrica Total, 2010) pode-se observar vários disjuntores de uma SE, todos eles isolados a gás.



Figura 6: Disjuntor isolado a gás SF₆

2.5.4 Transformadores de corrente

O transformador de corrente (TC) é um transformador para instrumento cujo enrolamento primário é ligado em série a um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de correntes de instrumentos elétricos de medição e proteção ou controle.

O enrolamento primário do TC é, normalmente, formado por poucas espiras, diferentemente do secundário, formado por um número elevado, fazendo com que a corrente no secundário seja bem menor do que a do primário, obedecendo a seguinte relação:

$$N_1 * I_1 = N_2 * I_2 \quad (2)$$

Onde N_1 é o número de espiras do primário do TC, I_1 a corrente do primário, N_2 o número de espiras do secundário e I_2 é a corrente do secundário.

O TC é um equipamento de suma importância para uma subestação, bem como para o sistema de transmissão ligado à essa SE. São eles os responsáveis por analisar a corrente que passa nos ramos de um sistema (através de seu enrolamento primário) e, através do enrolamento secundário, são os responsáveis por fornecer a corrente necessária para os relés de proteção, os quais irão indicar se está ou não havendo uma falha e, em caso positivo, realizar a abertura do disjuntor.

Os transformadores de corrente possuem corrente secundária padronizada em 5A.

Levando-se em conta o tipo construtivo dos TC's, podem ser citados:

- Tipo Primário Enrolado;
- Tipo Barra;
- Tipo Janela;
- Tipo Bucha;
- Tipo Núcleo Dividido.

Na Figura 7 (DUALIBE, 1999) é mostrado um esquema básico de um TC.

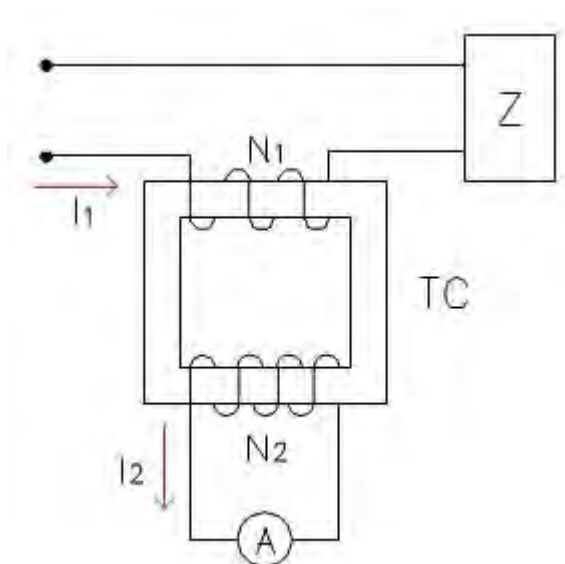


Figura 7: Esquema Geral de um TC

2.5.5 Transformadores de potencial

O transformador de potencial (TP) é um transformador para instrumento cujo enrolamento primário é ligado em derivação a um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição e proteção ou controle.

Os TP's, diferentemente dos TC's, apresentam o número de enrolamento do primário (N_1) maior do que o do secundário (N_2), obedecendo tal regra:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

Onde N_1 é o número de espiras do primário do TC, V_1 a tensão do primário, N_2 o número de espiras do secundário e V_2 é a tensão do secundário.

Assim, a tensão do secundário é menor do que a do primário.

O TP possui função bastante parecida com a do TC, porém, fornece uma tensão através do seu secundário, padronizada 115 V ou $115/\sqrt{3}$ V, que será analisada pelos relés de proteção para indicarem se a tensão do sistema está abaixo, acima ou se está de acordo com o valor nominal.

Na Figura 8 (DUALIBE, 1999), é mostrado o esquema geral de um Transformador de Potencial.

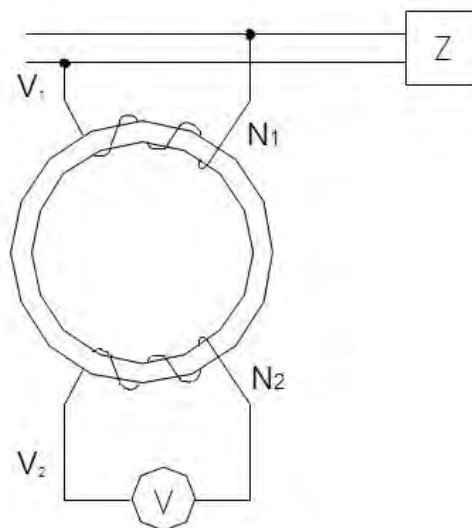


Figura 8: Esquema Geral de um TP

2.5.6 Transformadores de força

Transformadores são os principais equipamentos de uma SE, são os responsáveis por garantir uma determinada potência para uma instalação, uma cidade ou até mesmo a potência necessária a ser transmitida pela linha.

Representam cerca de 40% do preço de uma subestação convencional ao tempo e é necessário que todos os outros equipamentos realizem perfeitamente suas funções para que o mesmo possa ficar bem protegido contra qualquer tipo de falha na rede.

Para um mesmo nível de transformação de tensão, um transformador pode ser projetado para atender diversas faixas de potências, dependendo da aplicação ao qual ele será utilizado.

Em subestações de seccionamento de linha, os transformadores não são utilizados, já que nesse caso não se tem mudança do nível da tensão.

Na Figura 9 (Jogo do Poder, 2011) é representado um transformador de força.



Figura 9: Transformador principal

Conhecendo-se o funcionamento de uma subestação e o funcionamento de cada um dos seus principais equipamentos, o próximo capítulo irá mostrar o funcionamento do sistema de proteção necessário para assegurar um alto grau de proteção e confiabilidade dos equipamentos individuais e da SE no geral.

3 SISTEMAS DE PROTEÇÃO EM SUBESTAÇÕES

Para realizar a transmissão de energia elétrica em tensões elevadas e potências elevadas é necessário fazer uso de redes de alta tensão, para as quais é de suma importância a segurança de toda atividade inerente a sua exploração.

Quando se fala em segurança para a rede de alta tensão, atrela-se o conceito de proteção, que pode assumir diferentes definições:

- Proteção das pessoas, tanto de trabalhadores das empresas que atuam nesse ramo, quanto de moradores residenciais;

- Proteções de todos os equipamentos que constituem uma rede elétrica, estejam eles nas usinas (ex: geradores), nas subestações (ex: transformadores) ou qualquer outro ponto do sistema. Danos em equipamentos, principalmente dos que constituem o sistema de alta tensão, além de representarem enormes prejuízos financeiros para sua substituição ou reparo, podem ocasionar a interrupção do suprimento de energia em diversos níveis: ruas, bairros, cidades e até de um país inteiro, causando os chamados “apagões”, originando prejuízos muitas vezes imensuráveis;

As duas principais características de um bom sistema de proteção são:

- a) Segurança: o sistema deve ser capaz de operar nos casos em que seja estritamente necessário, evitando cortes desnecessários do fluxo de energia por determinado circuito;

- b) Obediência: o sistema deve operar sempre que seja necessário, ou seja, não pode ser insensível à presença de fenômenos que possam ocasionar danos materiais ou risco à vida.

Os fenômenos que causam problemas na interrupção do suprimento de energia estão relacionados aos curtos-circuitos e às sobrecargas, que originam o que se denomina genericamente uma falta. Por isso, são necessários equipamentos capazes de interromper rapidamente o circuito onde ocorreu a falta.

Para que o sistema de proteção e, principalmente, o sistema de comunicação de uma subestação possa trocar informações com os sistemas de outras SE foi necessário a criação de uma norma para que ficasse padronizada a comunicação entre os sistemas de diferentes subestações. Foi criada então a norma IEC 61850.

Os sistemas de proteção para sistemas de alta tensão têm como elementos chaves os Transformadores de Instrumentos (TC's e TP's) e dispositivos denominados relés de proteção.

3.1 Norma IEC 61850

Até os anos 80, existia muita dificuldade para se obter uma comunicação entre subestações diferentes, pois cada uma utilizava um protocolo diferente, prejudicando a comunicação de equipamentos de fabricantes diferentes.

Percebeu-se, então, a necessidade de padronizar as normas de comunicação entre os centros de transformações.

Então, no início dos anos 90, o *Electric Power Research Institute* (EPRI) em paralelo com as equipes IEC TC 57 e IEC TC 95, começaram a realizar estudos e ambos criaram normas: *Utility Communications Architecture* (UCA) – EPRI; *Interface of Protection Equipment* (IEC 6087-5-103) – IEC TC 57 e IEC TC 95.

Ambos (IEC e EPRI) decidiram se unir para criar uma única norma e, dessa maneira, padronizar de uma vez a comunicação, criando assim a IEC 61850 *Communication Networks and Systems in Substation* (IEC 61850 Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações).

A norma oferece a interação entre as operações dos sistemas de proteção, controle, elimina *gateways* (conversores de protocolos) e, principalmente, integram informações de equipamentos mesmo estes sendo de diferentes fabricantes, usando os chamados padrões não proprietários, reduzindo assim o custo das instalações, o monitoramento e a manutenção desses sistemas.

3.2 Relé de proteção

É um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nesse equipamento ou no circuito em que ele está ligado. São eles os verdadeiros responsáveis pelos comandos de abertura dos disjuntores de uma subestação, e que permitem a extinção de uma falta, ou seja, do isolamento da falta, em velocidades que chegam a milésimos de segundo.

A presença de relés de proteção é essencial no funcionamento dos sistemas elétricos, sendo sua operação diretamente dependente da filosofia e dos tipos comercialmente disponíveis. Assim, há a necessidade de uma evolução contínua para que possam ser atendidas as necessidades operacionais do sistema, com a finalidade de aumentar a confiabilidade e reduzir os prejuízos causados por problemas que ocorrem na rede elétrica.

Segundo o site www.instalacoeseltricas.com, estima-se que a produção anual de relés no mundo ultrapasse os 25 bilhões de unidades, destinados às mais variadas aplicações.

Os relés de proteção são equipamentos existentes há várias décadas e, construtivamente, podem ser eletromecânicos, eletrônicos ou digitais.

Os eletromecânicos eram muito utilizados antigamente, porém, com os avanços tecnológicos, foram sendo substituídos e, atualmente, usam-se os relés digitais na grande maioria das instalações.

3.2.1 Relés eletromecânicos

Os primeiros relés desenvolvidos tinham finalidades específicas para atuações devido a variações de algumas grandezas elétricas e seu funcionamento era baseado na atuação de forças produzidas pela interação eletromagnética entre as correntes e o fluxo magnético sobre um condutor móvel, sendo conhecidos como relés de proteção eletromecânicos. A Figura 10 (LSEE, 2008) ilustra os principais componentes que constituem um relé eletromecânico.

É importante salientar que os relés eletromecânicos atuam por forças criadas da combinação de sinais de entrada (correntes, tensões etc), energia armazenada em molas espirais ou em dispositivos de amortecimento de choques e vibração. Tais equipamentos podem utilizar múltiplos sinais de entrada, porém só executam um determinado tipo de função, ou seja, são monofuncionais.

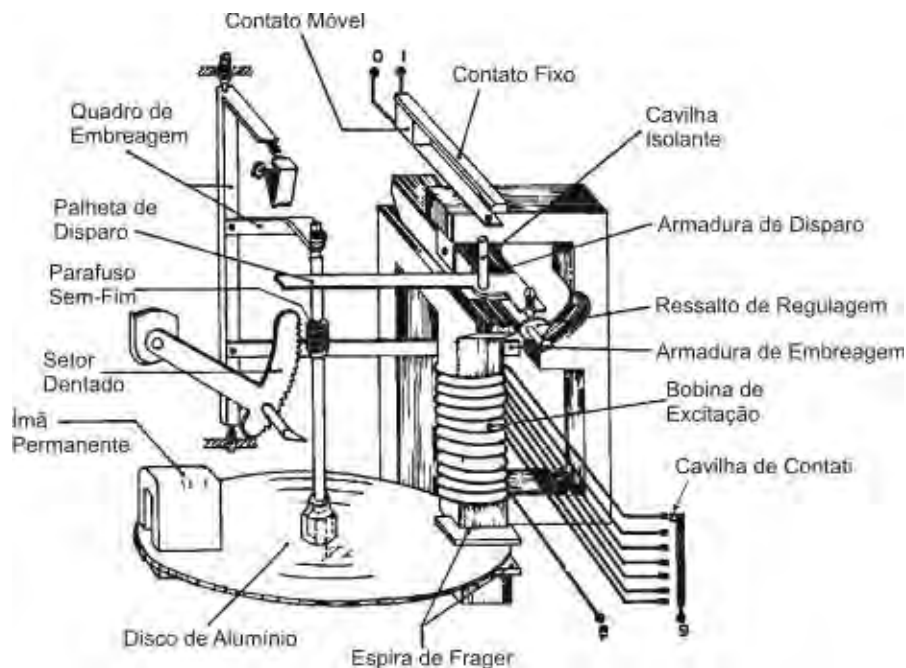


Figura 10: Principais componentes de um relé eletromecânico de corrente

Apresentam boa durabilidade e robustez (vida útil de até 40 anos), tolerância a altas temperaturas, baixa sensibilidade a surtos eletromagnéticos, sendo imunes à interferência. Devido aos custos de instalação e de manutenção serem altos e utilizarem maior espaço na SE, apresentam preço mais elevado. São relativamente lentos e, diferente dos relés digitais como será visto mais adiante, não há possibilidade de implementação de funções auxiliares.

Entre os principais relés eletromecânicos, os mais usados são: Relés de Magnitude; Relés Direcionais; Relés de Distância; Relés Diferenciais;

3.2.2 Relés eletrônicos

Além do aumento da velocidade de resposta, a implantação destes novos equipamentos eletrônicos permitiu diminuir o espaço físico das cabines de proteção nas subestações, aumentar a flexibilidade na proteção e a mudança das características pelo ajuste dos elementos lógicos.

Porém, estes dispositivos apresentavam alguns problemas em relação ao ambiente de instalação, pois apresentavam uma limitação quanto a temperatura e umidade do mesmo e também necessitava de uma fonte externa que pudesse suprir o fornecimento de energia, sendo necessário instalar sistemas de alimentação adicionais.

3.2.3 Relés Digitais

Com o passar dos anos, a necessidade por equipamentos cada vez mais rápidos e com maior confiabilidade foi sendo maior. Começaram-se a realizar estudos nessa área de atuação, principalmente na criação de algoritmos, para atingir o objetivo em questão, sendo criados os relés de proteção digitais.

Seu comando de abertura ou fechamento é realizado através de microprocessadores, sendo uma área de crescimento constante nos últimos anos.

A Figura 11 (ALMADA; SILVA, 2008) a seguir mostra o funcionamento básico de uma relé digital.

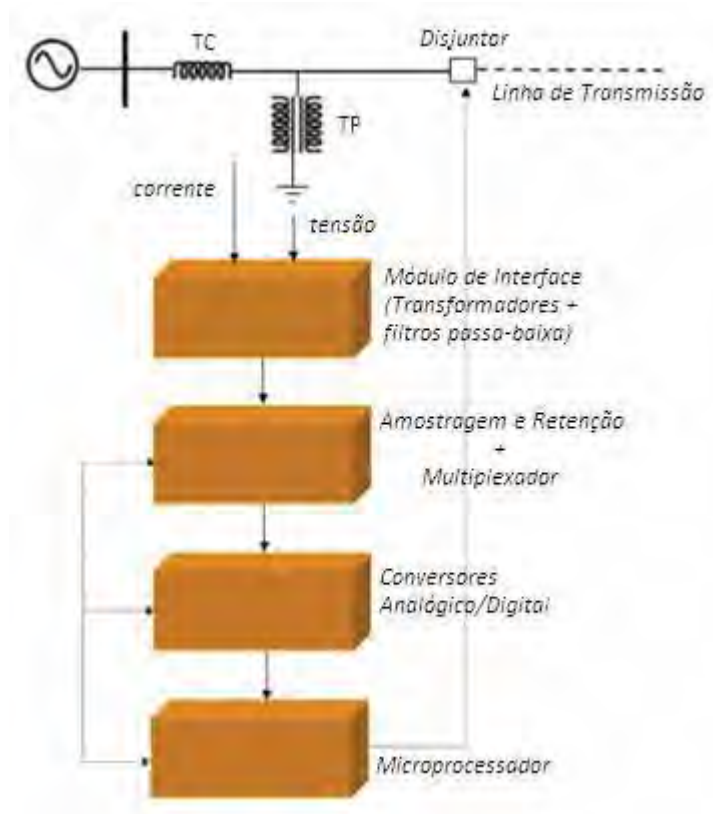


Figura 11: Funcionamento do Relé Digital

O Módulo de Interface recebe os sinais de tensão e corrente provenientes dos TP's e TC's respectivamente, sendo a tensão de 5V e corrente em 5A. É nessa etapa onde os sinais passam por um filtro passa baixa para que os sinais com as frequências que não interessam não continuem sendo transmitidos. O sinal resultante é amostrado e chega até um conversor Analógico/Digital para que possa ser comparado a outros níveis

digitais através do Microprocessador. Assim, caso haja alguma anormalidade no sinal amostrado, o microprocessador envia sinal de abertura do disjuntor, realizando a proteção do sistema.

Entre os benefícios que se pode encontrar através da utilização dos relés digitais em sistemas de proteção de subestações está a auto-verificação, que permite ao relé o monitoramento programado de seu próprio *hardware* e *software*, aumentando a confiabilidade do mesmo.

Esse tipo de relé faz com que o sistema fique todo interligado, facilitando a comunicação entre pontos distintos. Também possuem sistema de comunicação, controle e medição computadorizados, baixo custo quando comparado ao eletromecânico, e flexibilidade, sendo capaz de mudar suas características.

Conhecendo os mais variados tipos existentes de relés, é necessário agora adquirir conhecimento de alguns termos técnicos usuais sobre os sistemas de proteção e o que devem ser levados em consideração.

3.3 Coordenação e seletividade do sistema de proteção

Uma vez satisfeitos os critérios de proteção individual dos equipamentos, o próximo passo é analisar a coordenação de todos os dispositivos de proteção.

A coordenação da proteção de uma rede elétrica tem como principal objetivo garantir a seletividade no sistema elétrico, ou seja, fazer com que exerçam suas funções somente os equipamentos mais próximos do ponto onde ocorrer a falha.

A seguir é dado um exemplo de seletividade em uma SE. A Figura 12 (GE, 2011) representa um arranjo de uma subestação, bem como um esquema básico dos relés de proteção. Na figura, pode-se perceber que está sendo simulada uma falha no ramo da linha da carga ligada ao disjuntor A.

A corrente do sistema flui do gerador para as cargas, e os relés R1, R2 e R3 são os responsáveis por realizar o monitoramento de todo o sistema.

Quando ocorre a falha no ponto indicado, a mesma proporciona um aumento significativo da corrente de carga e, assim que o relé R1 percebe esse aumento, o mesmo envia uma ordem de abertura (*trip*) ao disjuntor A ao mesmo tempo que envia um sinal de bloqueio aos relés R2 e R3, informando que está sendo sensibilizado por

uma corrente de falta e que está atuando. Os relés R2 e R3 recebem esse sinal de bloqueio e, assim, não enviam sinal de *trip* para os disjuntores B e C respectivamente.

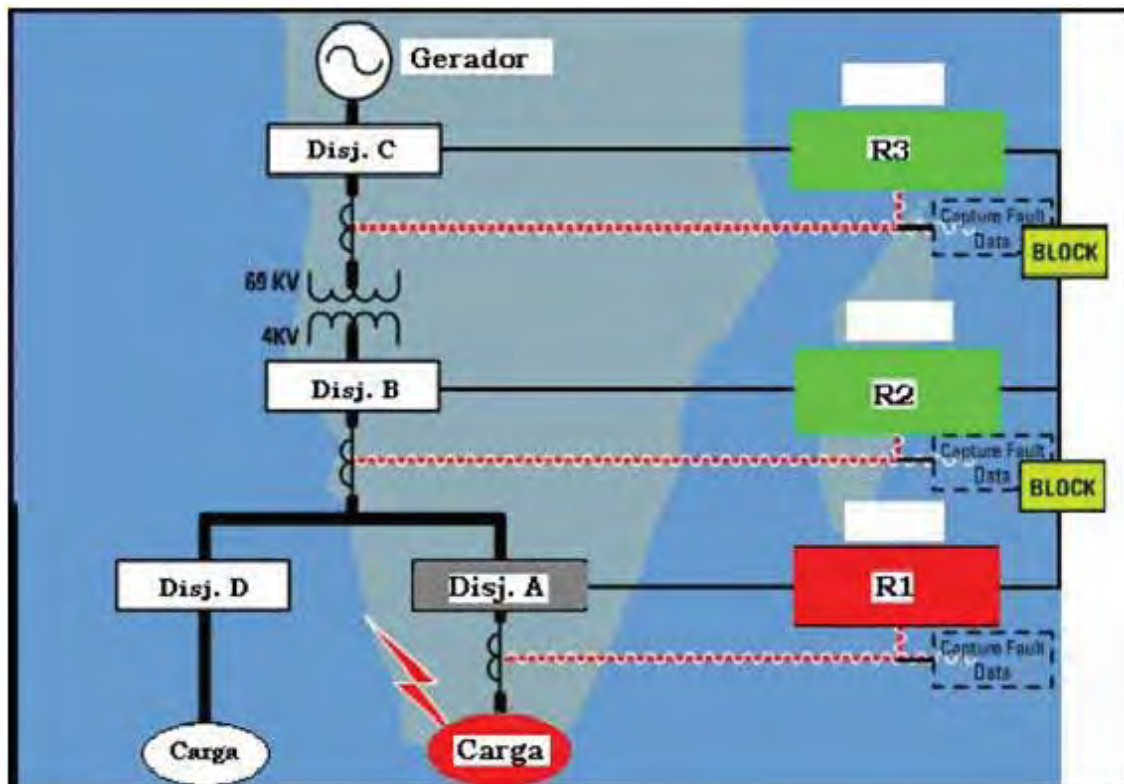


Figura 12: Ocorrência de falha na carga ligada ao Disj. 4

Com isso, apenas a carga ligada ao disjuntor A tem sua alimentação interrompida, protegendo todo o circuito, e a carga ligada ao disjuntor D permanece sendo alimentada, como pode ser observado.

Esse é o objetivo da seletividade, ou seja, fazer com que ocorra a desenergização apenas da ramificação onde está ocorrendo a falha.

Porém, caso o disjuntor A receba um sinal de *trip* mas não realiza a abertura de seus contatos, caracterizando uma falha, o relé R1 sinaliza para R2 a ocorrência desta falha. Imediatamente, o mesmo envia sinal de *trip* para o disjuntor B e sinal de bloqueio para o relé R3, impedindo a abertura do disjuntor C, como pode ser observado na Figura 13 (GE, 2011).

Nesse caso, as duas cargas existentes são desenergizadas, porém os equipamentos foram protegidos.

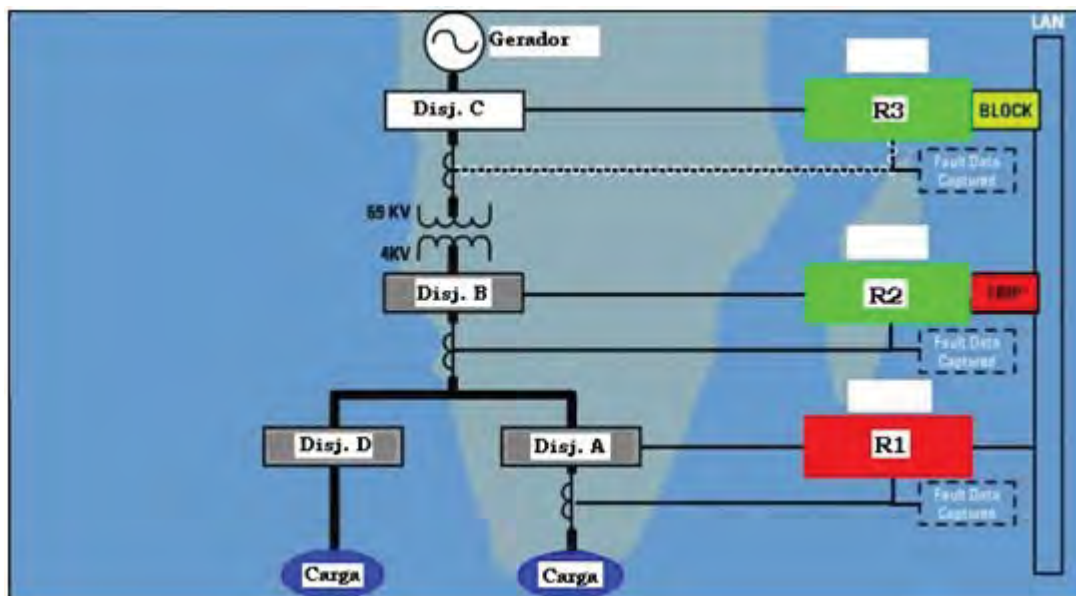


Figura 13: Falha no Disj. A e atuação do Relé R2

3.4 Termos técnicos referentes a relés e sistemas de proteção

Conhecendo-se os diferentes tipos de relés e seus funcionamentos, é importante conhecer também alguns termos técnicos bastante utilizados referentes a esse tema, os quais são padronizados e, portanto, conhecidos internacionalmente.

- *Pickup*: é ponto em que a tensão ou corrente injetada sensibilizam o relé de proteção, causando o início da operação;
- *Trip*: ponto em que o relé de proteção fecha os contatos de saída. Isso ocorre quando o valor da corrente ou tensão de *pickup* permanecem no sistema por um período de tempo especificado pelo usuário ou por um tempo definido por uma curva, também pré-determinada pelo usuário;
- *Dropout*: retorno dos contatos dos relés de proteção a sua posição de repouso ou *reset* da unidade de proteção após ter executado com sucesso sua operação.

Com o propósito de se criar um padrão para as funções de proteção, foi atribuído um número para cada uma delas, facilitando na pesquisa da função desejada e, o mais importante, na padronização dos equipamentos. No ANEXO A é mostrada uma tabela com as funções numéricas dos relés de proteção existentes.

4 RELÉS DIGITAIS

Este capítulo tem como referência o catálogo de relés digitais (SIEMENS, Catálogo SIP – 2008), onde maiores informações podem ser encontradas.

Neste capítulo serão apresentadas as características de dois tipos de relés digitais (7SJ64 e 7UT6), ambos da família SIPROTEC 4.

Os relés que serão apresentados possuem soluções bastante diversificadas, existindo, assim, uma solução específica para cada caso. Possui um projeto sofisticado e um *display* gráfico que auxiliam na leitura dos dados, proporcionando uma solução mais confiável.

Entre as características principais dos SIPROTEC 4, podem-se destacar:

- Oferece funções de proteção, controle e medição, sendo utilizados nas mais diversas aplicações;
- Permite que o usuário faça a escolha do padrão de comunicação que será utilizado, como os protocolos das normas IEC 61850 e IEC 60870-5-103, DNP 3, MODBUS e PROFIBUS;
- Oferece módulos de comunicação com funções de reabilitação e modernização com a norma IEC 61850 de comunicação.

A confiabilidade contra interferências eletromagnéticas é garantida através dos seguintes procedimentos:

- Relé em caixa metálica;
- Entrada do converso analógico/digital através de acoplamento óptico;
- Fonte conversores ca/cc;
- Saídas tipo relé;
- Interfaces seriais para fibra óptica.

Os conversores ca/cc isolam galvanicamente os circuitos estáticos internos dos externos.

4.1 Relé de proteção multifuncional com sincronização - SIPROTEC 4 7SJ64

A Figura 14 (SIEMENS, Catálogo SIP – 2008) mostra um tipo de relé com sincronizador que apresenta multifunções de proteção. Pode ser usado para controle de

proteção e medição para alimentadores de distribuição e linhas de transmissão em geral. O relé é adequado para redes que são radiais ou em laço e também para linhas com apenas um ou vários alimentadores.



Figura 14: SIPROTEC 4 7SJ64

O SIPROTEC 4 7SJ64 é equipado com uma função de sincronização que proporciona a operação no modo *synchronization check* (verificação de sincronia) ou *synchronous/asynchronous switching* (comutação síncrona / assíncrona), onde o primeiro é o modo clássico de operação e o segundo leva em consideração os atrasos existentes.

É possível também realizar a proteção de motores através do monitoramento da corrente e supervisão no tempo de partida, inibindo o religamento do mesmo caso isto ocorra muitas vezes, fazendo com que o rotor do motor fique travado caso ocorra algum tipo de falha.

Apresenta várias funções de proteção, sendo considerado como um relé bastante flexível quanto às possibilidades de uso, podendo ser adicionadas mais de 20 funções de proteção de acordo com as necessidades.

O relé proporciona um controle manual muito fácil e também funções de automação. O número das variáveis controladas depende do número de entradas e saídas disponíveis. A lógica programável integrada permite que o usuário possa implementar suas próprias funções, aumentando ainda mais sua flexibilidade e possibilidade de utilização nas mais variáveis aplicações.

O 7SJ64 é um relé de proteção numérica que, além das funções de controle e medição existente, assegura o fornecimento confiável de energia elétrica para os

clientes. A operação no local foi projetada de acordo com os critérios ergonômicos e possui um *display* grande, proporcionando uma fácil leitura gráfica.

A Figura 15 (SIEMENS, Catálogo SIP – 2008) a seguir mostra o diagrama de função desse relé, com a qual é possível perceber quais são os tipos de funções disponíveis no 7SJ64.

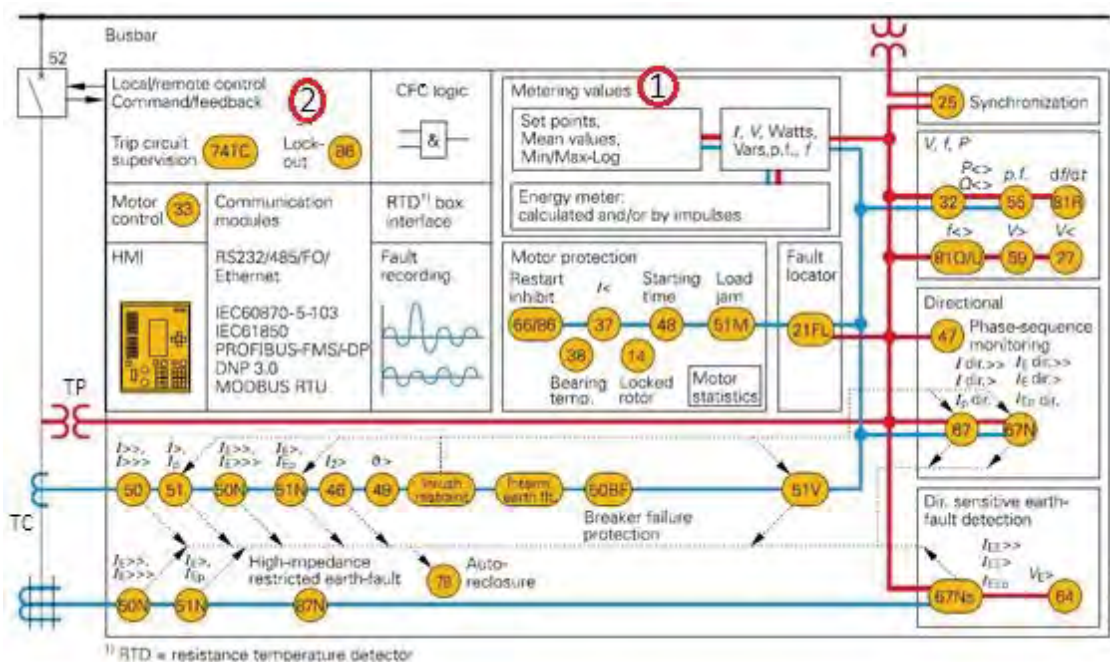


Figura 15: Diagrama de Função 7SJ64 (SIPROTEC NUMERICAL PROTECTION RELAYS)

É interessante destacar que é no bloco indicado pelo número 1 “Medida de valores” (*Metering values*) que são informados os valores nominais do relé e suas devidas tolerâncias às faltas. Pode-se observar que todas as funções numéricas de proteção são ligadas à esse bloco, pois fazem constantemente uma comparação entre os valores nominais setados e os valores reais de corrente e tensão que passam na linha.

No bloco indicado pelo número 2, estão presentes os microprocessadores responsáveis por dar o comando de abertura ou fechamento dos disjuntores.

As funções de proteção incorporadas no relé SIPROTEC 4 7SJ64 são:

- Proteção de sobrecorrente;
- Proteção de sobrecorrente direcional;
- Detecção de falta à terra;
- Tensão de deslocamento;

- Proteção de falta à terra intermitente;
- Alta impedância de falta à terra restrita;
- Contenção *Inrush*;
- Proteção de motor;
- Proteção contra sobrecarga;
- Monitoramento de temperatura;
- Proteção contra sub/sobretensão;
- Proteção contra sub/sobrefrequência;
- Proteção de taxa de mudança de frequência;
- Proteção de potência;
- Proteção contra falha de disjuntor;
- Proteção de sequência negativa;
- Monitoramento da sequência de fase;
- Sincronização;
- Auto-religamento;
- Localizador de falha;
- Bloqueio.

4.2 Relé de proteção diferencial para Transformadores, Geradores e Barramentos - SIPROTEC 4 7UT6

O relé de proteção diferencial SIPROTEC 4 7UT6 mostrado na Figura 16 (SIEMENS, Catálogo SIP – 2008), é usado quando é necessário uma rápida e seletiva eliminação das falhas causadas por curtos-circuitos em transformadores de todos os níveis de tensão e também em máquinas rotativas, como motores e geradores.

Este relé pode ser parametrizado tanto para transformadores trifásicos quanto para monofásicos e é através da parametrização que se faz a escolha de uma aplicação específica, podendo, o relé, ser adaptado para atuar sobre uma determinada falha.

Além da função de proteção diferencial, o relé possui também proteção de sobrecorrente para cada enrolamento do transformador. Como opcionais, podem ser citadas as funções de proteção restrita a falta à terra, proteção de sequência negativa e proteção de falha de disjuntor.



Figura 16: SIPROTEC 4 7UT6

Alguns modelos como 7UT613 e 7UT633, possuem quatro níveis de tensão de entrada e, por isso, funções como proteção de sub/sobretensão, proteção de sentido de energia, falha no fusível do monitor e proteção de sobreexcitação, estão também presentes nesses relés.

Os relés 7UT6 possuem uma espécie de caixa de monitoramento externa capaz de medir e monitorar a temperatura do relé, sendo possível realizar a medição completa da temperatura do transformador.

São providos de funções de automação e controle locais de fácil uso. A lógica programável integrada, assim com no 7SJ64, permite que o usuário possa implementar suas próprias funções, como por exemplo, a automação das chaves seccionadoras ou também o seu intertravamento.

Na Figura 17 (SIEMENS, Catálogo SIP – 2008), é mostrado o diagrama de funções de um relé de proteção numérico 7UT6. São principalmente utilizados para

realizarem a função de proteção diferencial de transformadores, geradores, motores, seções de pequenas linhas, pequenas barras e de reatores em paralelo ou em série.

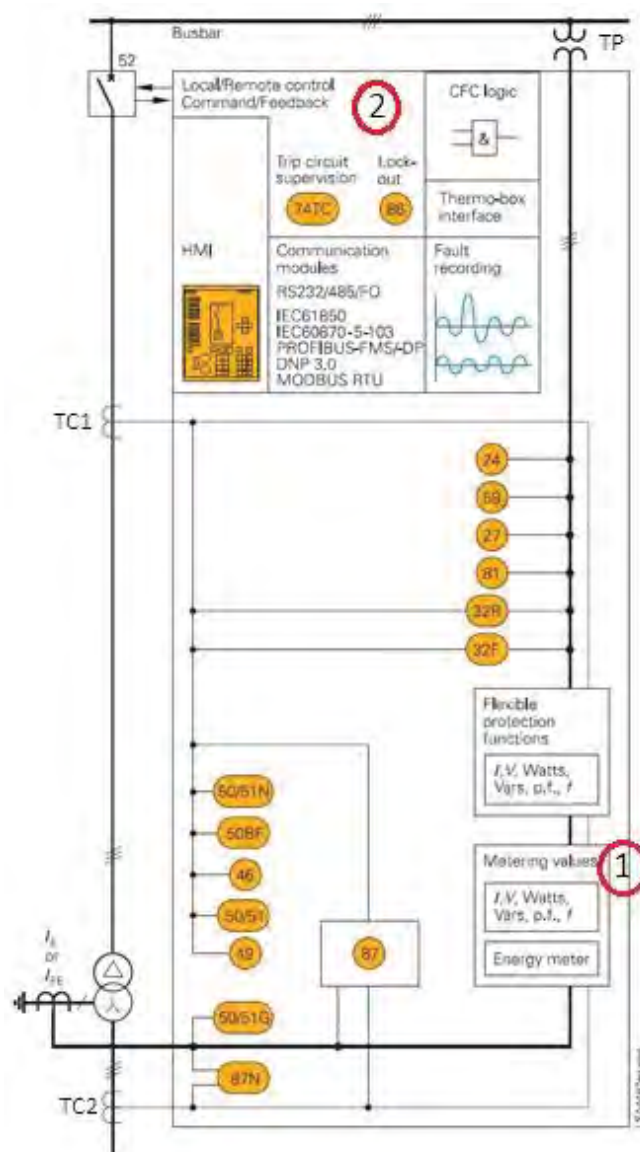


Figura 17: Diagrama de Funcção 7UT6 (SIPROTEC NUMERICAL PROTECTION RELAYS)

Os TC's que se encontram no primário do transformador (TC1) e no secundário (TC2) são os responsáveis por fornecer ao relé os dados necessários para a realização da proteção diferencial do transformador. A diferença entre a corrente primária e a secundária deve ter sempre o mesmo valor e, caso haja alguma anormalidade, o relé irá dar comando de abertura para o disjuntor.

É importante destacar a presença dos blocos representados pelos números 1 e 2, assim como no relé 7SJ64. No bloco 1, são informados os valores nominais de corrente,

tensão e demais parâmetros nominais do relé. O bloco 2 é o responsável por enviar o comando de *trip* do disjuntor.

O usuário pode selecionar a função de proteção do relé através da mudança de alguns parâmetros durante a configuração do relé e, portanto, somente esses parâmetros são necessários durante sua configuração, o que torna esse procedimento mais simples dos que os outros tipos. Por esse motivo, o 7UT6 pode realizar a proteção de uma subestação com arranjo barra simples composta por até 12 alimentadores diferentes.

As funções de proteção incorporadas no relé SIPROTEC 4 7UT6 são:

- Proteção diferencial;
- Medições sensíveis para pequenas faltas de corrente;
- Desligamento rápido quando há grandes faltas de corrente;
- Restrição contra a corrente *Inrush* do transformador;
- Proteção de sobrecorrente de fase ou de terra;
- Proteção de sobrecarga com ou sem medição de temperatura;
- Proteção de sequência negativa;
- Proteção contra falha do disjuntor;
- Impedâncias altas e baixas restritas de falha de terra;
- Função de proteção de tensão (7UT613/633).

5 ESTUDO DE CASO

Após realizados os estudos sobre sistema de proteção de subestações automatizadas, é feita uma análise de um caso real de utilização de relés de proteção. O estudo de caso é da SE de uma concessionária do Norte do país.

Tratou-se de uma ampliação da SE Castanhal, subestação de seccionamento de linha localizada no município de Belém - PA, que consiste na construção dos vãos de interligações das SE's Utinga C1 e Santa Maria C2, com a SE Castanhal, ambos com arranjo barra dupla quatro chaves, e da linha de transmissão (LT) para interligar essas duas subestações, todos com tensão de 230kV. O diagrama unifilar simplificado da SE em questão é mostrado na Figura 18.

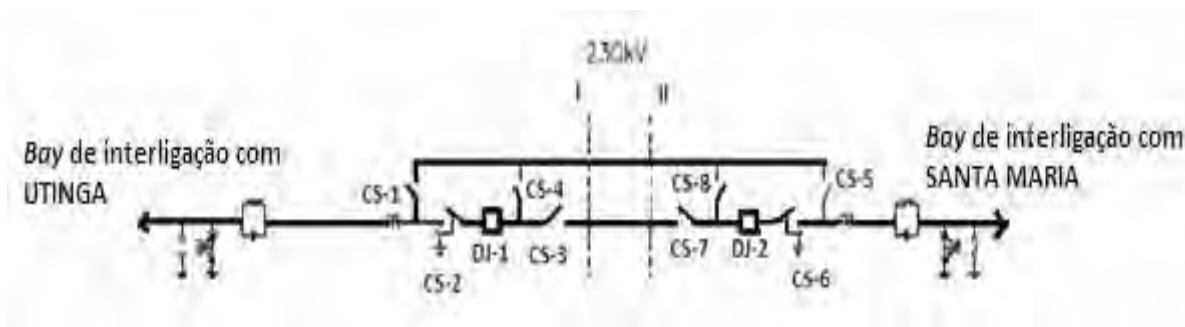


Figura 18: Diagrama unifilar simplificado da SE Castanhal

Neste trabalho é analisado apenas o sistema de proteção utilizado para os dois vãos de LT, não entrando na análise da proteção da linha de transmissão.

A solução que é mostrada a seguir foi sugerida por uma empresa de engenharia, na área específica de sistemas de proteção, controle e supervisão de subestações de alta tensão.

5.1 Esquema de proteção

Os relés aplicados pertencem à linha SIPROTEC e são do tipo digital, funcionando como unidades autárquicas, independentemente do sistema digital de comando, medição e supervisão.

A aplicação, desempenho e testes dos dispositivos de proteção utilizados são de acordo com a Norma IEC255, IEC61850. Os relés são à prova de interferências eletromagnéticas conforme norma IEC 255-22-1 a 4.

As funções de proteção que foram utilizadas para o projeto atendem integralmente todas as solicitações da especificação técnica exigida pelo cliente.

5.1.1 Relés utilizados

Para a automatização da transferência das linhas e proteção da subestação em questão, foram utilizados três tipos de relés: o 7SJ64, o 7SA6 e o 7SS52.

O relé 7SJ64 é um relé multifunção e, nesse caso, controla a abertura e fechamento do disjuntor (DJ-1) e das quatro chaves seccionadoras (CS-1, CS-2, CS-3, CS-4) do *bay* de interligação com Utinga.

É o responsável por realizar a medição da corrente, tensão, potência ativa e reativa que está passando por esse vão de entrada.

Possui as seguintes funções: 50/51, 50N/51N, 51V, 49, 46, 87N, 37, 47, 59N/64, 50BF, 74TC, 86, 27/59, 81 O/U, 79, 25, 21FL (vide Anexo A).

Para essa SE em questão, foi necessário a utilização de dois relés desse tipo, ou seja, um para o *bay* de entrada que interliga a SE Castanhal com a SE Utinga e outro para fazer a interligação com a SE Santa Maria.

O relé 7SA6 é um tipo de relé de distância para todos os níveis de tensão. Realiza a comparação entre uma corrente I e uma tensão V medidas na mesma extremidade do elemento protegido (nesse caso o *bay* de entrada). São mais rápidos, seletivos e menos afetados pela variação da capacidade geradora. A operação do relé não é afetada por variações de carga ou por variações de tensões após defeito, ou seja, o tempo de operação permanece aproximadamente constante.

A aplicação desse relé para esse projeto é:

- Proteção de Distância de Fase e de Terra (21 + 21N)
- Proteção de derivação de linha "Stub" (50ST/87ST)
- Proteção de Sobrecorrente de Fase (50/51)
- Proteção de Sobrecorrente de Neutro (50/51N)
- Proteção de Sobretensão instantânea (59I) e temporizada(59T)

- Proteção de Sobrecorrente Direcional de Neutro (67N)
- Proteção Contra Oscilação de Potência (68/78)
- Esquemas Universais de Teleproteção (85)
- Localizador de faltas (96)
- Oscilografia incorporada (98)

O relé 7SS52 é um relé de proteção digital de barra e proteção contra falha do disjuntor.

Na SE em questão, realiza as seguintes funções:

- Proteção Contra Falha de Disjuntor (50/62BF) – caso haja falha na abertura do disjuntor, o relé entra em operação através do fechamento da lâmina de terra da chave seccionadora CS-2.
- Proteção de Sobrecorrente Direcional de Neutro (67N)
- Proteção Diferencial de barras (87B)

Para o *bay* de interligação com Santa Maria também foi utilizado um relé desse tipo, pois há a necessidade de realizar as mesmas proteções nos dois *bay*'s.

5.2 Considerações quanto ao desempenho dos TC's

Internamente ao relé, os transformadores de entrada são isolados galvânicamente através de capacitores, filtros, etc, para evitar e suprimir as interferências eletromagnéticas externas.

Por exemplo, os relés detetores de corrente da proteção diferencial numérica 7SS52 são insensíveis aos transitórios pós-falta que aparecem no secundário dos transformadores de corrente dos vãos. Possuem um conversor CA/CC, que oferece a separação galvânica entre a tensão da bateria e o conjunto de circuitos eletrônicos, protegendo-os contra ruídos externos e garantindo que a tensão fornecida pela bateria não será inserida nos circuitos eletrônicos.

Algumas considerações quanto as proteções com relação ao desempenho transitório são: os relés de proteção utilizados foram instalados e projetados para instalações em “casa de relés” e em painéis adequados garantindo a compatibilidade

eletromagnética (EMC); todos os cabos de interligações externas aos painéis de diferenciais de barras (corrente e controle), deverão ser blindados, com sua blindagem aterrada em ambas as pontas. Os cabos de força/controle deverão ser segregados dos cabos de corrente.

É recomendado que os cabos de corrente sejam dimensionados com maior seção possível. Os comprimentos destes deverão ser os menores possíveis, com isso tem-se a menor impedância no secundário dos TC's. Desta maneira evita-se que haja saturação do núcleo dos TC's, principalmente nos 3 primeiros milissegundos.

É essencial um baixo valor ôhmico na conexão à terra do relé, para isso, recomenda-se cordoalha de aterramento nos pontos de terra dos relés com menor percurso possível dos condutores de aterramento.

Também recomenda-se uma caixa de junção no pátio, para concentrar os cabos de corrente, evitando lances maiores de cabos e minimizando a impedância do secundário dos TC's.

Preferencialmente recomenda-se empregar secundários com núcleos exclusivos para a proteção diferencial de barras, os quais não deverão ter outros relés envolvidos.

Recomenda-se conhecer o desempenho transitório dos TC's envolvidos com a proteção de barras. É importante determinar o "tempo de saturação" dos TC's para verificação analítica das correntes distorcidas secundárias com o tempo (método do IEEE), para garantir uma maior qualidade e exatidão nos valores lidos pelos relés.

5.3 Benefícios Alcançados

Para este estudo de caso, os benefícios verificados com a utilização dos três relés foram: um aumento da resolução de tempo nas medições para efeitos de proteção; a possibilidade de registrar valores instantâneos de tensão e corrente para condições de falta, condição para auto-monitoramento, além do aumento da velocidade, confiabilidade e qualidade da energia elétrica recebida pelos consumidores.

A Tabela 1 (ANEEL, 2009) e a Tabela 2, mostram a relação dos parâmetros DIC, FIC e DMIC exigidos pelas ANEEL, com o tempo decorrido para a realização da proteção que a empresa responsável garantiu.

Tabela 1: Limite de Continuidade por Unidade Consumidora

| Sistema | Limite de Continuidade por Unidade Consumidora | | | | | | |
|-------------|---|-------|--------|--------------------|-------|--------|--------------|
| | Unidades Consumidoras com Faixa de Tensão Nominal: $69\text{kV} \leq \text{Tensão} < 230\text{kV}$ | | | | | | |
| | DIC (horas) | | | FIC (interrupções) | | | DMIC (horas) |
| | Anual | Trim. | Mensal | Anual | Trim. | Mensal | Mensal |
| Interligado | 5,00 | 3,00 | 2,00 | 5,00 | 3,00 | 2,00 | 1,50 |
| Isolado | 6,00 | 4,00 | 3,00 | 6,00 | 4,00 | 3,00 | 2,50 |

Tabela 2: Tempos garantidos pela Empresa para realizar a proteção

| Descrição | Tempo garantido pela Empresa |
|--|------------------------------|
| Tempo de Operação da Proteção de Distâncias para unidades autônomas. | 25ms |
| Tempo de atuação da proteção de derivação de linha “Stub” | 25ms |
| Tempo de atuação da proteção diferencial | 25ms |
| Tempo total de eliminação da falta (incluindo tempo de abertura dos disjuntores) | 100ms |
| Tempo decorrido entre a ocorrência de um alarme e a sua exibição para o operador no macro alarme e no sumário de alarmes | 2s |

Analisando o período Mensal, a duração das interrupções pode chegar até no máximo duas horas, sendo que podem ocorrer no máximo duas interrupções nesse período. Porém, uma mesma interrupção não pode ultrapassar uma hora e meia, como mostra o parâmetro DMIC.

Observando a Tabela 2, conclui-se que os tempos necessários para que a proteção seja realizada com sucesso é muito inferior ao tempo permitido. Outro dado importante de ser analisado é o tempo que demora para o operador ficar sabendo da ocorrência da falha (2 segundos), um tempo muito pequeno e, caso seja necessário, o mesmo pode realizar alguma manobra manual e mesmo assim ter se passado um curto período de tempo, não ultrapassando os limites permitidos pela ANEEL.

São fatos como esse que fazem do Sistema Elétrico de Potência Brasileiro um dos mais confiáveis do mundo.

6 CONCLUSÃO

As subestações são peças fundamentais durante a transmissão de energia elétrica dos centros geradores até os consumidores em geral, sejam eles industriais, urbanos ou residenciais.

Em razão disso, o estudo e entendimento do funcionamento da SE no geral e de cada um dos seus equipamentos são de suma importância para que a transmissão e distribuição possam ocorrer perfeitamente, com grande confiabilidade e para aumentar cada vez mais a qualidade da energia entregue. A automatização das subestações ajudou bastante para que esses objetivos pudessem ser alcançados.

Por isso a razão de se estudar o sistema de proteção das SE's, que atua contra falhas ocorridas em qualquer ponto do sistema de transmissão e distribuição, protegendo os equipamentos da própria SE e também não permitindo que chegue até as residências um surto de tensão ou corrente capaz de danificar nenhum equipamento de uma residência por exemplo.

Durante este trabalho pode-se perceber a importância que os transformadores de corrente e de potencial têm para que a proteção ocorra de forma eficiente. Esses equipamentos, conhecidos como transformadores de instrumentos, são os responsáveis por entregar aos relés de proteção a corrente e a tensão necessária para que se possa realizar a leitura e fazer a comparação com os níveis ideais, permitindo a avaliação da ocorrência ou não de uma falha no sistema.

Também comentou-se sobre a nova geração de relés, os denominados relés digitais. Com os exemplos de relés digitais dados no Capítulo 4, pode-se perceber que os mesmos são mais rápidos e eficientes que os eletromecânicos. Muitos tipos são multifuncionais, sendo possível que um mesmo relé possa ser responsável por realizar várias funções de proteção, diminuindo assim o número de equipamentos utilizados.

Os relés digitais que foram dados como exemplo, possuem IHM e também a possibilidade de programação de alguns parâmetros fundamentais, diversificando ainda mais o uso dos mesmos.

Com o estudo de caso que foi realizado foi possível perceber a utilização real em uma SE, onde um mesmo relé foi utilizado para diversas funções de proteção. Se fossem utilizados relés eletromecânicos, seriam necessários um relé para cada tipo de

proteção requerida, porém, foram necessários apenas três tipos para realizar a proteção total da SE.

Através do estudo de caso apresentado, foi possível verificar a diminuição do número dos relés eletromecânicos, que foi proporcionada pela simples utilização dos relés digitais, além de uma maior confiabilidade durante o envio de *trip*. Com apenas três relés de proteção foram solucionados os problemas de proteção para a SE em questão, fato antes que seria necessário muito mais relés eletromecânicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LSEE – Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica. Disponível em:< http://143.107.235.69/index.php?option=com_content&view=article&id=9:reles-numericos-de-protecao-&catid=8:protecao-digital-de-sistemas-eletricos-de-potencia&Itemid=18>. Acesso em: 14 de Novembro de 2011

GE. Disponível em:< <http://www.gesupply.com.br/imagens/pdf/circuitos.pdf> >. Acesso em: 20 de Outubro de 2011

CR ENERGIA - 2007. Disponível em:< <http://www.crenergia.com.br/servicos.php> >. Acesso em: 25 de Outubro de 2011

ADPERC. Disponível em:< <http://www.adperc.com.br/chaves.html> >. Acesso em: 25 de Outubro de 2011

ELÉTRICA TOTAL. Disponível em:< <http://eletricatotal.wordpress.com> >. Acesso em: 25 de Outubro de 2011

JOGO DO PODER. Disponível em:< <https://jogodopoder.wordpress.com/tag/gestao-publica/page/18> >. Acesso em: 27 de Outubro de 2011

INSTALAÇÕES ELÉTRICA.COM - FINDER. Disponível em:< <http://www.instalacoeseletricas.com/teoria.asp?id=6> >. Acesso em: 29 de Outubro de 2011

JARDINI, A. J. – Sistemas Digitais para Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia – São Paulo, 1996

CAVALCANTI, A. C. – Disjuntores e Chaves aplicação em sistemas de potência

ALMADA, JANAÍNA BARBOSA; SILVA, MARIA IZABEL BATISTA VIEIRA – Sistema de Proteção. – Fortaleza, 2008

CAMINHA, A. C. – Introdução à proteção dos sistemas elétricos – São Paulo – Editora Edgard Blucher, 1977.

CARVALHO, MICHEL ROCKEMBACH DE – Relés Eletromecânicos

DUALIBE, PROF. PAULO – Consultoria para Uso Eficiente de Energia – Novembro de 1999.

GURJÃO, E. C.; SOUZA, B.A. – Aspectos de Comunicação da Norma IEC 61850

HANS, ERIK OLOVS ESON; SVEN, ANDERS LEJDEBY – O Setor Elétrico Brasileiro – Abril de 2009

MAMEDE, J. FILHO – Manual de Equipamentos Elétricos – Aparecida, SO – Editora Santuário, 1994.

LINS, ZANONI DUEIRE – Proteção de Sistemas Elétricos – Setembro de 2010 – Vol. Rev. 2

LSEE – LABORATÓRIODE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA – 12 de Setembro de 2008

NUNES, RENATA S. – Norma IEC 61850: características e possibilidades de implementação na automação de subestações de energia – Ijuí, 2006

SIEMENS – SIPROTEC *Numerical Protection Relays - Protection Systems – Catalog SIP 2008*

SOUTO, ALAN DE OLIVEIRA; FONSECA, MARCOS DE OLIVEIRA – Automação de Subestações Industriais - 2007

ANEXO A

| Número | Descrição |
|---------|---|
| 12 | Elemento de Sobrevelocidade |
| 21 | Elemento de Distância |
| 24 | Elemento Volts/Hertz |
| 25 | Elemento de Verificação de Sincronismo |
| 27 | Subtensão |
| 32 | Elemento Direcional de Potência |
| 37 | Subcorrente |
| 38 | Elemento de Sobretemperatura nos Mancais |
| 39 | Elemento de Vibração nos Mancais |
| 40 | Perda de Excitação |
| 46 | Desbalanço de Corrente (ou sobrecorrente de Sequência Negativa) |
| 47 | Desbalanço de Tensão (ou sobretensão de Sequência Negativa) |
| 48 | Rotor Bloqueado |
| 49 | Elemento de Sobretemperatura no Estator |
| 50 | Sobrecorrente Instantâneo de Fase |
| 51 | Sobrecorrente Temporizado de Fase |
| 51V | Sobrecorrente de Fase com Restrição por Tensão |
| 50G/50N | Sobrecorrente Instantâneo de Terra/Neutro |
| 51G/51N | Sobrecorrente Temporizado de Terra/Neutro |
| 50BF | Elemento de Falha do Disjuntor |
| 59 | Sobretensão |
| 59N | Sobretensão de Neutro |
| 60 | Falha do Fusível do TP |
| 64 | Falta à Terra no Estator |
| 64R | Falta à Terra no Rotor |
| 67 | Sobrecorrente Direcional de Fase |
| 67G/67N | Sobrecorrente Direcional de Terra/Neutro |
| 68 | <i>Out-of-step</i> (proteção de falta de sincronismo) |
| 74 | Elemento de Alarme |
| 79 | Religamento |

| | |
|-----|------------------|
| 81U | Subfrequência |
| 81O | Sobrefrequência |
| 86 | Bloqueio |
| 87 | Diferencial |
| 94 | Elemento de Trip |