

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande



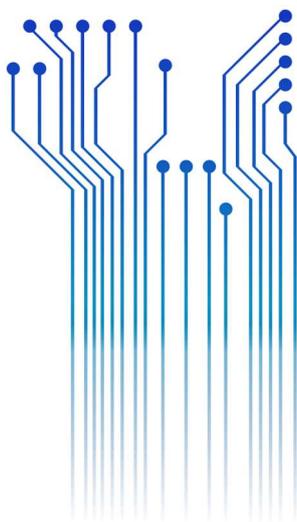
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

VINICIUS AUGUSTO MORAIS NEGROMONTE



Departamento de
Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ESTUDO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO



Campina Grande
2018

Vinícius Augusto Morais Negromonte

ESTUDO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador:

Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Campina Grande
2018

Vinícius Augusto Morais Negromonte

ESTUDO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor: Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais,
meus irmãos e todos os meus amigos que
sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marconi e Dilma, que sempre me apoiaram e me deram suporte emocional e financeiro ao longo do curso, mesmo longe eles mantiveram contato comigo quase que diariamente e com toda certeza isso foi fundamental para aliviar um pouco a saudade que eu tinha da minha casa.

Agradeço aos meus irmãos, Felipe, Ricardo e Rodrigo, que sempre foram presentes na minha vida, eles sempre estão ao meu lado seja me apoiando e oferecendo ajuda ou comemorando comigo.

Agradeço os meus familiares, que sempre se preocuparam comigo e ofereceram ajuda das mais diversas formas.

Agradeço a todos os meus amigos, que estiveram comigo durante todos esses anos e que foram indispensáveis para que eu aguentasse passar tanto tempo longe da minha família.

Agradeço também ao professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra por ter aceitado me orientar neste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica.

Resumo

As subestações têm um papel muito importante no processo de transmissão e fornecimento de energia elétrica. Portanto, é necessário que cada subestação funcione perfeitamente para garantir maior eficiência e qualidade na distribuição de energia. O sistema de proteção de uma subestação é o que garantirá que a subestação funcionará de acordo com o esperado, pois nele se encontram os dispositivos capazes de detectar falhas no sistema e isolar os trechos sem prejudicar o fornecimento de energia. Por isso, nos últimos anos, as subestações estão cada vez mais automatizadas, oferecendo maiores recursos de operação e manutenção dos sistemas elétricos.

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo, inicialmente, relatar as vantagens que a substituição dos relés eletromecânicos pelos relés microprocessados vem trazendo para as subestações, garantindo maior confiabilidade e segurança. Em seguida será mostrado como é dada a atuação dos relés sobre os equipamentos e como são feitas suas interligações na execução do projeto.

Palavras-chave: Subestação, Energia Elétrica, Sistema de proteção, Relés microprocessados,

Abstract

The electrical substations have a very important role in the power transmission and supply. Therefore, it's necessary that each one of them works perfectly, to ensure efficiency and quality in the energy distribution. Protection system will ensure that an electrical substation works as expected; therefore, over the past years, electrical substations are increasingly automated, offering more operational and maintenance resources for the electrical systems.

The student, through this final paper has, initially, the intention to describe the advantages of replacing electromechanical relays to microprocessor relays is bringing to electrical substations, ensuring better trust and safety; later, it's shown how these relays act over the equipments and how to make its interconnections to the project.

Key-words: Electrical Substation, Electrical energy, Protection Systems, Microprocessor Relays.

Lista de Ilustrações

Figura 1: Fotografia de um Transformador de Força.....	17
Figura 2: Fotografia de um Transformador de corrente.....	18
Figura 3: Esquema do modelo industrial de TC	19
Figura 4: Aplicação do TP de acordo com sua classe de exatidão	20
Figura 5: Fotografia de um Transformador de Potencial	20
Figura 6: Fotografia de uma Chave Seccionadora	21
Figura 7: Disjuntor a Gás SF6 69kV	22
Figura 8: Religador 13.8kV	23
Figura 9: Fotografia de um Para-raios.....	24
Figura 10: Relé Microprocessado da SEL.....	25
Figura 11: Arquitetura de um relé microprocessado.....	26
Figura 12: Relés instalados em um painel de controle.....	27
Figura 13: Esquema da função de falha no disjuntor 50BF.....	32
Figura 14: Fotografia do Painel UCS.....	36
Figura 15: Esquema dos níveis de automação em uma subestação	37
Figura 16: Diagrama funcional dos disjuntores de 69kV da SE Imbiribeira	39
Figura 17: Parte de um projeto de Interligação	40
Figura 18: Cabos lançados na canaleta	42
Figura 19: Cabos com seus respectivos TAGS.....	42
Figura 20: Fios anilhados e interligados aos bornes no painel.....	43
Figura 21: Botoeiras para comando local e chave Local/Remota do disjuntor 69kV	45
Figura 22: Equipamento injetor SMC Raptor injetando corrente no secundário do TC	46

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANSI	American National Standard Institute
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COS	Centro de Operações do Sistema
GVO	Grande Volume de Óleo
IEC	International Electrotechnical Comission
<i>IEEE</i>	<i>Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos</i>
KV	KiloVolts
MPCC	Medição, Proteção, Comando e Controle
PVO	Pequeno Volume de Óleo
SE	Subestação
TAC	Teste de Aceitação em Campo
TAF	Teste de Aceitação em Fábrica
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Tensão

Sumário

1. Introdução	13
1.1. Objetivos	14
1.2. Estrutura do trabalho.....	14
2. Introdução a Subestações.....	15
2.1. Classificações de uma subestação	15
2.1.1. Quanto a função do sistema elétrico:	15
2.1.2. Quanto ao modo de instalação:.....	16
2.1.3. Quanto ao sistema da subestação:	16
2.1.4. Quanto ao nível de tensão.....	16
2.1.5. Quanto ao tipo de isolamento.....	16
2.2. Principais equipamentos de uma subestação	17
2.2.1. Equipamento de transformação.....	17
2.2.2. Equipamentos de manobras.....	20
2.2.3. Equipamentos de Proteção	23
3. Relés de Proteção.....	24
3.1. Arquitetura de um relé microprocessado.....	25
3.2. Vantagens dos relés microprocessados.....	27
3.2.1. Velocidade de atuação	28
3.2.2. Medição	28
3.2.3. Automonitoramento	28
3.2.4. Instalação	29
3.2.5. Integração com o sistema supervisório	29
3.2.6. Manutenção.....	29
3.3. Funções de proteção.....	30
3.3.1. Função de sobrecorrente (50/51)	30
3.3.2. Função de sobretensão (27).....	30
3.3.3. Função de subtensão (27).....	31
3.3.4. Função de falha do disjuntor (50BF).....	31

3.3.5. Outras funções	32
4. Sistema de proteção, supervisão e controle	33
4.1. Tipos de proteção	33
4.1.1. Proteção Primária	34
4.1.2. Proteção de Retaguarda.....	34
4.1.3. Proteção de Transformadores	34
4.1.4. Proteção de Barramentos.....	34
4.1.5. Proteção de Linha.....	35
4.2. Subsistema de controle e supervisão;.....	35
5. Projeto de um sistema de proteção.....	38
5.1. Projeto Funcional	38
5.2. Projeto de Fiação	40
5.3. Projeto de Interligação	40
5.4. Execução do projeto.....	41
6. Comissionamento	44
6.1. Teste de aceitação de campo	44
6.2. Energização	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil está em constante transformação, exigindo que as empresas estejam sempre prontas para atuar em ambientes cada vez mais dinâmicos, disponibilizando energia com maior confiabilidade e qualidade. Para que isso ocorra, é necessário que cada subestação funcione de acordo com o esperado, pois elas que possuem dispositivos de proteção capazes de detectar faltas e isolar os trechos onde elas ocorrem.

O sistema de proteção é de extrema importância para que uma subestação funcione de maneira correta e por isso é fundamental para garantir eficiência e qualidade do fornecimento de energia elétrica. Idealmente, esse fornecimento não deve apresentar falhas, pois elas podem acarretar em danos ao sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. É impossível que o sistema elétrico fique totalmente imune a defeitos e perturbações, mas é possível reduzi-los consideravelmente.

Os esquemas de proteção atuam sempre que ocorrer alguma condição anormal no sistema, isso se deve ao fato de que eles são projetados para receber, em tempo real, as informações das grandezas elétricas do sistema. Essas grandezas são recebidas, através de sensores, pelos relés de proteção, que atuam sobre equipamentos de manobra como disjuntores, religadores e chaves seccionadoras, que isolam o trecho defeituoso do sistema, impedindo que os danos atinjam os equipamentos principais como transformadores, linhas de transmissão, barramentos, etc.

Ao longo dos anos, os relés de proteção evoluíram muito e hoje são microprocessados, oferecendo maiores recursos de operação e manutenção dos sistemas elétricos. Isso tornou o sistema de proteção cada vez mais confiável e seguro, devido ao uso de tecnologia de ponta nos processos operacionais.

1.1. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é estudar o sistema de proteção de uma subestação, mostrando as vantagens da utilização dos relés microprocessados e explicando como é feita a execução do projeto pela empresa que constrói a subestação.

1.2. Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta a seguinte distribuição. O capítulo 1 é introdutório, contextualiza o trabalho, apresenta seus objetivos e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo dá uma breve introdução sobre o conceito de subestação, citando os tipos de subestações existentes e fazendo uma breve explanação sobre a função de algum dos equipamentos que participam do sistema de proteção.

No capítulo 3 será explicado a atuação do relé no sistema de proteção, mostrando algumas das possíveis funções que os relés podem exercer, além de mostrar as vantagens dos relés microprocessados em relação aos relés eletromecânicos.

O capítulo 4 irá explicar a filosofia de proteção de sistemas elétricos, abordando os tipos de proteção de uma subestação, detalhando seu funcionamento e mostrando como a automação das mesmas torna o sistema muito mais confiável. Nessa etapa também será feita uma breve introdução sobre o sistema de supervisão e controle.

A 5 capítulo irá mostrar como é feita a execução de um projeto de um sistema de proteção de uma subestação, baseado no acompanhamento dessa execução no processo de melhoramento da subestação SE Imbiribeira pela empresa FAAB Engenharia LTDA. Essa etapa irá mostrar também como é feito o comissionamento após a instalação, ou seja, os testes de aceitação para garantir que todos os equipamentos estejam funcionando de acordo o esperado.

2. INTRODUÇÃO A SUBESTAÇÕES

Uma subestação é um conjunto de equipamentos de alta potência que direciona e controla o fluxo de energia, transformando os níveis de tensão, possibilitando sua diversificação por rotas alternativas.

No percurso entre as unidades geradoras e o destino final, a energia elétrica passa por diversas subestações, e sua tensão é elevada ou rebaixada por transformadores de potência. As subestações elevadoras são construídas, geralmente, no início da transmissão, pois assim diminuem a perda de energia ao longo do caminho. Já as subestações no final de um sistema de transmissão, próximas aos centros de cargas, ou de suprimento a uma indústria é uma subestação abaixadora.

2.1. Classificações de uma subestação

Existem várias formas de classificar uma subestação: quanto a função no sistema elétrico, quanto ao modo de instalação dos equipamentos em relação ao meio ambiente, quanto ao sistema da subestação, quanto ao nível de tensão e quanto ao tipo de isolamento.

2.1.1. Quanto a função do sistema elétrico:

- Subestação Transformadora: converte o nível de tensão através do transformador, podendo ser SE Transformadora Elevadora ou SE Transformadora Abaixadora
- Subestação Seccionadoras, de Manobra ou de Chaveamento: interliga circuitos de mesmo nível de tensão, possibilitando sua multiplicação, permitindo manobrar o fluxo de potência do sistema.

2.1.2. Quanto ao modo de instalação:

- Subestação externa ou ao tempo: os equipamentos são instalados ao ar livre e estão sujeitos a condições indesejáveis do tempo, que podem desgastar os equipamentos, exigindo manutenções mais frequentes.
- Subestação interna ou abrigada: os equipamentos são instalados ao abrigo de tempo.

2.1.3. Quanto ao sistema da subestação:

- De transmissão: Está inserida no sistema de transmissão.
- De distribuição: Está inserida no sistema de distribuição.
- De consumidor: São responsáveis por interligar um consumidor com o sistema elétrico de potência.

2.1.4. Quanto ao nível de tensão

- Baixa tensão: até 1kV
- Média tensão: entre 1kV e 66kV
- Alta tensão: entre 69kV e 230kV
- Extra alta tensão: entre 231kV e 800kV
- Ultra alta tensão: acima de 800kV

2.1.5. Quanto ao tipo de isolamento

- Aéreas: o meio isolante que separa as linhas com diferentes níveis de potencial elétrico é o ar.
- Blindadas: o meio isolante é o gás.
- Híbridas: o ar e o gás são meios isolantes em diferentes pontos.

2.2. Principais equipamentos de uma subestação

Os equipamentos de uma subestação são divididos em: equipamentos de transformação, equipamentos de manobras, equipamentos de medição, equipamentos de proteção e serviço auxiliar.

2.2.1. Equipamento de transformação

- Transformador de Força

São responsáveis por transformar o nível de tensão, elevando, no caso de subestações elevadoras, o que aumenta o aproveitamento econômico da energia elétrica em trechos de linhas mais longos, pois a partir dos transformadores de força, foi possível a transmissão de tensões cada vez maiores, e rebaixando no caso das subestações abaixadores, para que a energia elétrica possa ser distribuída para os centros de consumo.

Figura 1: Fotografia de um Transformador de Força



Fonte: Próprio Autor

- Transformador de corrente (TC)

Com o objetivo de redução de perdas, devido às suas grandes extensões, o sistema elétrico de potência exige o uso de correntes e tensões cada vez mais elevadas. Para que sejam controlados e protegidos, estes

sistemas utilizam instrumentos de medição e proteção que necessitam receber informações destas grandezas. Por isso, os TCs são de extrema importância para o sistema de proteção da subestação, pois eles fornecem, no seu circuito secundário, correntes suficientemente reduzidas e isoladas do circuito primário, tornando elas compatíveis com os valores de suprimento de relés e medidores, alimentando as bobinas de correntes desses instrumentos.

Figura 2: Fotografia de um Transformador de corrente



Fonte: Próprio Autor

Os TCs são classificados em dois tipos: TC para serviço de medição, que são caracterizados pela boa precisão e baixa corrente de saturação, e TC para serviço de proteção, que se caracteriza pela baixa precisão e alta corrente de saturação.

Os TCs para serviço de medição devem manter o seu erro para sua classe de exatidão para correntes de carga na faixa indicada pela equação:

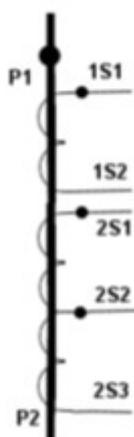
$$0,1 * I_{nominal\ do\ TC} \leq I_{carga} \leq I_{nominal\ do\ TC}$$

Suas classes mais usuais são de 0,3, 0,6 e 1,2%.

Já os TCs de proteção devem ser precisos até o seu erro aceitável para corrente de curto-circuito de 20 vezes sua corrente nominal. Portanto, o núcleo magnético do TC de proteção deve ter seção transversal grande, para não saturar no instante do curto-circuito. Os núcleos magnéticos dos TCs de medição são de seção menor que os de proteção, para propositalmente saturarem durante os curtos-circuitos.

Modelos industriais de TCs têm os terminais primários indicados como P1 e P2. Os terminais secundários são indicados como 1s1, 1s2, 1s3, 2s1..., onde o primeiro número indica o número do enrolamento, a letra indica o símbolo do terminal e o último indica o número da derivação terminal do secundário.

Figura 3: Esquema do modelo industrial de TC



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Transformador_de_corrente

- Transformador de potencial (TP)

Assim como os TCs, os TPs também são muito importantes para o sistema de proteção da subestação, pois eles fornecem, no seu circuito secundário, tensões suficientemente reduzidas, tornando elas compatíveis com a máxima tensão suportável pelos relés e medidores, alimentando as bobinas de potencial desses instrumentos.

Os TPs também são classificados de acordo com a classe de exatidão, de acordo com a figura:

Figura 4: Aplicação do TP de acordo com sua classe de exatidão

APLICAÇÃO	CLASSE DE EXATIDÃO
Aferição e calibração de instrumentos de medição de laboratórios	0,1 %
Alimentação de medidores de demanda e consumo para fins de faturamento	0,3 %
Alimentação de medidores de demanda e consumo sem fins de faturamento	0,6 %
Alimentação de relés de proteção	1,2 %
TP's de Proteção	10%

Figura 5: Fotografia de um Transformador de Potencial



Fonte: Próprio Autor

2.2.2. Equipamentos de manobras

- Chaves Seccionadoras

São dispositivos destinados a isolar equipamentos, zonas de barramentos ou trechos de linhas de transmissão. Com seus contatos fechados, elas devem manter a condução de sua corrente nominal, inclusive de curto-circuito até a abertura do disjuntor, sem sobreaquecimento.

Figura 6: Fotografia de uma Chave Seccionadora



Fonte: Próprio Autor

- **Disjuntores**

São os mais eficientes equipamentos de manobra de uma subestação, destinados à operação em carga, com função de interromper a corrente elétrica de um circuito quando acionada sua abertura. O disjuntor deve ser capaz também de extinguir o arco elétrico que é formado ao se interromper a corrente elétrica. O tipo de disjuntor será definido pela tecnologia aplicada na extinção do arco elétrico. Os tipos mais comuns são: Grande volume de óleo (GVO), pequeno volume de óleo (PVO), gás e à vácuo.

Os disjuntores podem ser acionados de 3 maneiras. O comando manual, através de botões no próprio disjuntor. O comando elétrico, através de botoeiras fixadas em um painel de comando. O comando automático, através dos relés de proteção.

Este equipamento deve possuir duas bobinas de abertura e uma de fechamento. Cada uma desses circuitos deverá ter um circuito de alimentação e um de controle. Todos os sinais de supervisão disponíveis como, pressão SF6, supervisão de bobina, etc., devem ser implementados no sistema de controle da subestação.

Figura 7: Disjuntor a Gás SF6 69kV



Fonte: Próprio Autor

- Religadores

São utilizados para diminuir o tempo de interrupção de fornecimento de energia em casos de falhas que não sejam permanentes no sistema, pois após detectar um problema o religador realiza um ciclo pré-programado de aberturas e fechamentos até o desaparecimento do defeito ou até considerar que o defeito é permanente.

Os religadores são cada vez mais frequentes em subestações de pequeno porte, onde o nível de curto-circuito e o estudo de coordenação de isolamento permitem sua instalação.

Figura 8: Religador 13.8kV



Fonte: Próprio Autor

2.2.3. Equipamentos de Proteção

- Para-raios

É um equipamento de proteção que tem como função limitar os valores dos surtos de tensão transitório de origem externa, provocados por descargas atmosféricas, ou origem interna, provocados por manobras e chaveamentos.

O para-raios, que inicialmente funciona como isolador, após atingir um valor pré-definido de sobretensão, passa a funcionar como um condutor,

descarregando parte da corrente para a terra, evitando que os equipamentos elétricos sofram danos causados por esses surtos.

Figura 9: Fotografia de um Para-raios



Fonte: Próprio Autor

3. Relés de Proteção

Os relés de proteção são considerados os equipamentos mais importantes do sistema de proteção de uma subestação, pois monitoram, em tempo real, o sistema elétrico e atuam para retirar a falha num menor espaço de tempo e maior eficiência possível. Através das medições de corrente e tensão coletadas pelos TCs e TPs, respectivamente, detectam o defeito e enviam comandos de abertura, geralmente chamados de “trip”, para os

disjuntores, religadores ou chaves seccionadoras, que irão isolar a falta do resto do sistema, para que os outros equipamentos continuem operando normalmente e não sejam danificados.

Os valores nos quais se dá a atuação dos relés são chamados de valores de ajustes. Para relés microprocessados esses valores são designados geralmente pelo fabricante através do estudo da seletividade que analisa diversos fatores, tais como: modelo e tipo do relé, dados técnicos de TCs e TPs, impedâncias de sequência positiva e zero por quilômetro, parâmetros elétricos das linhas de transmissão, etc.

Figura 10: Relé Microprocessado da SEL

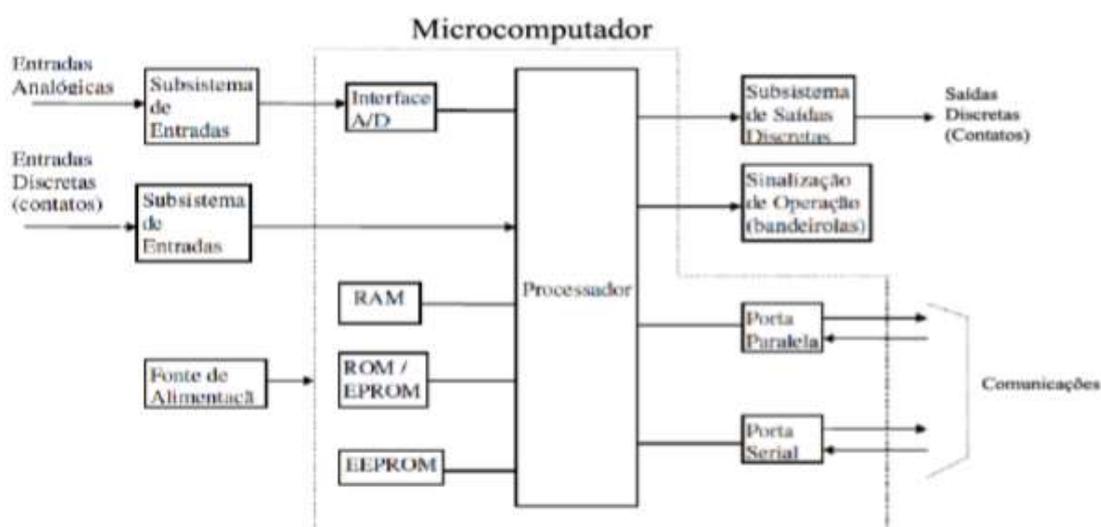


Fonte: Próprio Autor

3.1. Arquitetura de um relé microprocessado

Um relé microprocessado possui em sua arquitetura diversas partes que estão ligadas entre si como indica a figura 10.

Figura 11: Arquitetura de um relé microprocessado



Fonte: SONALDO [2009], Trabalho de Conclusão de Curso – UFCG, SISTEMA DE SUPERVISÃO, CONTROLE E PROTEÇÃO DA SUBESTAÇÃO ELEVADORA UTE MURICY I.

As funções de algumas dessas partes são descritas abaixo:

- As entradas analógicas compreendem grandezas como tensões e/ou correntes.
- As entradas discretas têm a função de informar o processador sobre o estado lógico de chaves seccionadoras e disjuntores e outros relés.
- O subsistema de saídas discretas é enviar sinais de desligamento e religamento para os disjuntores.
- O processador consiste em um microprocessador que desempenha função de processamento do algoritmo no qual se baseia o funcionamento do relé, tomando decisão em termos de atuação ou de não atuação.
- As portas seriais permitem a introdução de dados para ajustes dos valores dos parâmetros de atuação do relé.
- As portas paralelas permitem o intercâmbio de informações em tempo real.

3.2. Vantagens dos relés microprocessados

Com o passar do tempo, os relés eletromecânico foram sendo substituídos por relés microprocessados ou digitais, pois esses apresentam diversas vantagens tanto economicamente, como tecnicamente. Os painéis de proteção onde são instalados os relés digitais ocupam um espaço muito menor, pois eles exercem várias funções de proteção e controle em um mesmo equipamento, dependendo da programação que é inserida no equipamento. Esses relés também utilizam uma menor quantidade de fiação na sua instalação e são muito atrativos financeiramente falando.

Figura 12: Relés instalados em um painel de controle



Fonte: Próprio Autor

Uma das grandes vantagens desse tipo de equipamento é que, hoje, devido a vasta utilização dos relés microprocessados, foi necessário padronizar as funções de proteção e qualquer relé vendido tem seu sistema de funcionamento padronizado pelas normas ANSI/IEEE e IEC. Além das funções

de proteção unificadas, a comunicação entre os equipamentos independe do fabricante, ou seja, podemos ter relés de diversos fabricantes em uma mesma subestação.

Além disso, podemos citar diversas outras vantagens dos relés microprocessados em relação aos eletromecânicos.

3.2.1. Velocidade de atuação

Nos relés eletromecânicos era necessário a utilização de temporizações para impedir que o relé atuasse de maneira indevida, o que acarretava em um retardo na atuação do mesmo quando ocorresse uma falta. Nos relés microprocessados, devido ao tratamento mais refinado dos sinais recebidos e a utilização de alguns sinais lógicos é possível filtrar diversos fatores que acarretariam em uma indevida atuação do relé, tais como: componentes harmônicas que podem atrapalhar na leitura do relé, componentes simétricas que não são utilizadas para os cálculos das funções de proteção, corrente de partida dos motores de indução, dentre outras.

3.2.2. Medição

Outra vantagem desse tipo de relé, é que, com os valores obtidos de tensão e corrente através dos TPs e TCs, respectivamente, eles tem a capacidade de calcular diversos valores do sistema, tais como, componentes simétricas de corrente, ângulo de fase, potência ativa, reativa e aparente, dentre outros.

3.2.3. Automonitoramento

Os relés digitais são capazes de auto monitorar seus próprios componentes e circuitos de abertura. Ao detectar alguma falha em seu

hardware, o relé é capaz de enviar um sinal para o operador da subestação ou de se retirar automaticamente do sistema. Esses relés tem a capacidade de monitorar outros circuitos externos a ele, como as bobinas de disjuntor no campo.

3.2.4. Instalação

Com a utilização dos relés microprocessados temos diversas vantagens também na instalação. Uma delas é o baixo consumo de potência devido ao fato de que eles são capazes de integrar proteção a medição, o que reduz a demanda de potência. Isso também faz com que diminua a solicitação de carga pelos TCs e TPs.

Outra vantagem é que esses relés ocupam muito menos espaço que os relés eletromecânicos, pois com os relés eletromecânicos é necessário um relé para cada função de proteção, já os relés digitais são capazes de executar diversas funções em um só equipamento.

3.2.5. Integração com o sistema supervisório

Nos relés eletromecânicos, qualquer tipo de comando forçado que fosse necessário, deveria ser feito mecanicamente no próprio relé. Já nos relés microprocessados, esses comandos podem ser feito por um sistema supervisório que pode se comunicar com relé. Esse sistema supervisório deve possuir pelo menos dois níveis. O primeiro é na própria subestação e o outro são as centrais regionais de comando.

3.2.6. Manutenção

Os relés necessitam de testes de rotina para garantir que eles estão funcionando de acordo com o esperado. Uma das vantagens dos relés

microprocessados é que eles apresentam uma função de auto teste, que permite que o próprio relé verifique o funcionamento do seu software e hardware. Isso garante que o relé não precise ser desconectado do sistema e também não há a necessidade de um operador para os testes.

Além disso, os relés eletromecânicos utilizam peças móveis em sua estrutura e isso aumenta o desgaste mecânico devido ao uso, o que faz com que as manutenções tenham que ocorrer com maior frequência nesse tipo de relé.

3.3. Funções de proteção

Neste capítulo serão mostrados algumas das principais funções de proteção.

3.3.1. Função de sobrecorrente (50/51)

Os relés que implementam essa função atuam quando a corrente ultrapassar a corrente para a qual ele foi parametrizado inicialmente, ou seja, quando a corrente for maior do que os limites pré-estabelecidos para o funcionamento adequado dos equipamentos.

A atuação do relé nesse tipo de função pode ser instantânea (50) ou temporizada (51). No caso dos temporizados, é inserido um atraso intencional ao sistema de proteção após a detecção da sobrecorrente. Já nos instantâneos, após a corrente atingir o limite pré-definido, a atuação deve ser imediata, dependendo apenas do processamento interno da lógica do relé.

Este tipo de relé é conectado ao secundário dos TCs, portanto serão parametrizados para valores proporcionais aos valores de corrente que realmente circulam no equipamento protegido, que se encontram no primário do TC.

3.3.2. Função de sobretensão (59)

Os relés que implementam essa função atuam quando a tensão ultrapassar a tensão para a qual ele foi parametrizado, ou seja, quando a

tensão for maior que os valores normais aceitos para a operação de um dado sistema ou equipamento.

Assim como na função de sobrecorrente, os relés que apresentam função de sobretensão também podem ter sua atuação instantânea ou temporizada. Uma proteção instantânea pode ser ajustada para garantir a operação no caso de uma sobretensão severa, garantindo a integridade dos equipamentos. A proteção temporizada pode ser usada para definir uma proteção em zona dois que só deve operar quando o relé responsável pela proteção do vão não operar devidamente.

Este tipo de relé é conectado ao secundário dos TPs, portanto serão parametrizados para valores proporcionais aos níveis de tensão que realmente estarão presente no equipamento protegido, que está no primário do TP.

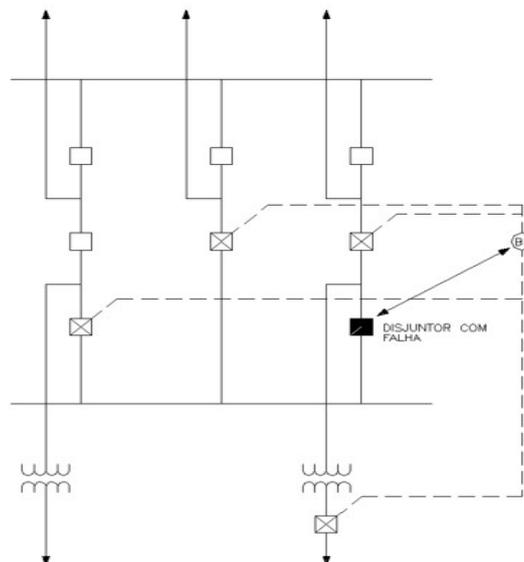
3.3.3. Função de subtensão (27)

Essa função é utilizada para detectar quedas na tensão do sistema e apresenta duas etapas de medição do valor da tensão com temporização entre elas. É gerado um sinal de partida se a tensão se tornar menor do que a tensão definida como normal para a operação do sistema. Se após a segunda medição, o problema persistir, o relé atua. Essas subtensões podem ocorrer durante a ocorrência de faltas ou condições normais de operação.

3.3.4. Função de falha do disjuntor (50BF)

Caso seja enviado comando de trip para um disjuntor e o mesmo não responder ao comando, relés com a função 50BF enviam este comando para outros disjuntores adjacentes ao defeito. Esses outros disjuntores podem estar na mesma subestação ou em uma subestação remota, no caso de um disjuntor na entrada da linha, por exemplo.

Figura 13: Esquema da função de falha no disjuntor 50BF



Fonte: MARTINS, Diego luz. Estudo do caso na automação, proteção e supervisão de uma subestação classe 69kV

Na figura, foi enviado um comando de abertura para o disjuntor indicado e o mesmo não abriu, então a função 50BF atuou enviando um sinal de abertura para os demais disjuntores adjacentes aquele com a falha.

3.3.5. Outras funções

Além das funções citadas anteriormente, pode-se citar também:

- Função de sobrecorrente direcional (67): Monitora o relé de sobrecorrente e tem sensibilidade em relação ao sentido do fluxo de energia que trafega no sistema, melhorando a seletividade pra isolar a falta uma vez que considera a direcionalidade do defeito.
- Relé de bloqueio (86): Opera comandado por outros relés, bloqueando a energização de outros equipamentos.
- Relé de distância (21): Opera para defeitos em linhas de transmissão de alta tensão.
- Função de frequência: são utilizadas tanto na proteção de sistema elétrico quanto para a proteção de equipamentos sensíveis a variação de frequência.

4. Sistema de proteção, supervisão e controle

A técnica de selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um sistema elétrico, para que seja possível isolar e remover alguma falha no sistema, sem que outras partes sejam afetadas é chamada de filosofia de proteção. :

- Velocidade: é a capacidade que a proteção deve ter de agir em tempo pré-determinado que possa atender as características específicas do sistema.
- Seletividade: a proteção deve ter a capacidade de reconhecer, selecionar e isolar apenas o equipamento defeituoso do sistema, evitando desligamentos desnecessários.
- Sensibilidade: é a capacidade que proteção deve ter de atuar em condições adversas do sistema para qual foi projetada, sendo capaz de responder a essas anormalidades com menor margem de tolerância possível entre a operação e não operação dos equipamentos.
- Confiabilidade: a proteção deve estar em condições de atuar sempre que ocorra uma falha no sistema, independentemente de qualquer condição externa, respeitando sempre a seletividade e sensibilidade configuradas.

4.1. Tipos de proteção

Um bom esquema de proteção deve garantir a proteção do sistema sem prejudicar a continuidade do serviço. O excesso de proteção, além de aumentar os investimentos, pode conduzir a um excesso de desligamentos, o que diminuiria a confiabilidade do sistema de proteção.

Por isso a proteção é dividida em alguns tipos para que se aumente a seletividade da proteção: proteção primária, proteção de retaguarda, proteção de transformador, proteção de barramento e proteção de linha.

4.1.1. Proteção Primária

É a primeira linha de defesa contra curtos-circuitos. Cada seção de linha, barra, transformador e gerador de um sistema são protegidos por proteção primária por suas respectivas zonas de atuação. Geralmente são usados relés direcionais para que seja possível identificar e o local do ponto da falta, com a intenção de que sejam relés mais seletivos.

4.1.2. Proteção de Retaguarda

Deve atuar caso haja falha na proteção primária. Deve atuar também caso haja falha do disjuntor, excluindo faltas detectados pela proteção primária. Essa proteção deve ser alimentada de TCs e TPs e tensão contínua de controle independente da usada para proteção primária. A proteção de retaguarda deve atuar sobre disjuntores diferente daqueles em que atuam a proteção primária. Essa proteção não deve atuar até ter a certeza de que a proteção primária não atuou, portanto os relés devem ser seletivos em relação aos relés primários.

4.1.3. Proteção de Transformadores

As faltas mais constantes nos transformadores são as faltas fase-terra, espira a espira ou do enrolamento primário para o secundário, pode ocorrer também faltas fase-fase. Na proteção de transformadores são utilizados diversos tipos de proteção, tais como: análise de gás, relé de pressão, relé de sobrecorrente, proteção de sobrecarga, proteção diferencial do transformador, entre outras.

4.1.4. Proteção de Barramentos

Assim como na proteção dos equipamentos, a proteção de barramentos também possui proteção primária e proteção de retaguarda. Na proteção de

barramentos podemos utilizar relés de sobrecorrente diferencial, relés de sobretensão diferencial, dentro outros.

4.1.5. Proteção de Linha

Devido sua longa extensão, há grande possibilidade de ocorrer descargas elétricas nas LT's. Sendo assim, as linhas estão mais propícias a ocorrência de faltas. Na proteção de linhas são utilizados relés de distância, relés de sobrecorrente instantâneos ou temporizados. Podemos utilizar também um esquema de proteção chamado Teleproteção que tem a função de abrir os dois disjuntores da extremidade da linha em que ocorreu a falta, isolando a mesma.

4.2. Subsistema de controle e supervisão;

Com o sistema de controle e supervisão, o que antes era feito manualmente, agora pode ser feito de forma computacional, ou seja, a função desse sistema é automatizar uma subestação. Com este sistema, atividades como anotações de medidas, manobra de seccionadoras e disjuntores, verificação de alarmes, entre outras, são realizadas de forma mais rápida, eficiente e segura.

Na figura 12 é mostrado o painel de UCS que é o painel de em que se encontra o subsistema de controle e supervisão.

Figura 14: Fotografia do Painel UCS



Fonte: Próprio Autor

Dentre as principais funções desse subsistema, podemos citar:

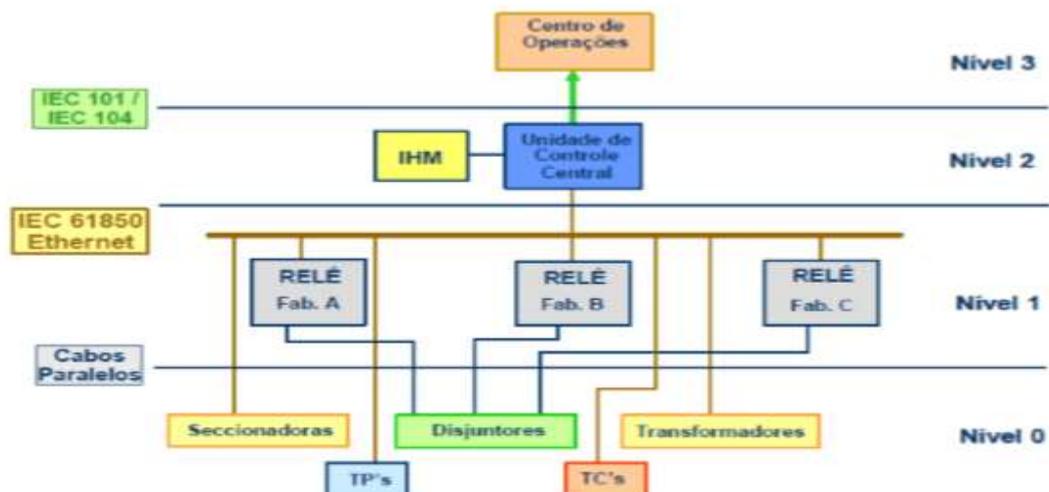
- Alarme: alertam o operador de alguma alteração de um status importante para o perfeito funcionamento da subestação. Caracteriza uma irregularidade funcional de algum equipamento, dos limites de medições ou do sistema digital.
- Intertravamento lógico: efetuam o bloqueio ou a permissão de ações de comando nos equipamentos em função da topologia das subestações. Estas lógicas visam preservar a segurança operativa e a vida útil dos equipamentos.
- Registro de dados: armazenam diversas informações como medições, indicações de estados, alarmes e ações de operação, para que seja possível uma análise geral pós-operação.
- Comando remoto: os equipamentos podem ser manobrados através da casa de comando, por meio de interface gráfica de comando.
- Monitoração: apresentam diversas medidas, tais como, tensão, corrente, frequência, temperatura de transformadores, fator de potência, potência ativa, reativa e aparente, dentre outras. Apresentam também o estado dos equipamentos da SE.

- Interface homem-máquina: recursos gráficos de operação que permitem a visualização dos estados dos equipamentos, verificação das medições realizadas e das sinalizações de alarmes.

Os sistemas digitais para todos os tipos de automação são compostos por vários níveis hierárquicos de ação, e visam prover os meios para operação e manutenção do sistema elétrico. Os níveis de automação podem ser identificados por:

- Nível 0: formado pelos equipamentos de pátio tais como: disjuntores, chaves seccionadoras, religadores, entre outros.
- Nível 1: constituído pelos relés de proteção que estão distribuídos nos painéis.
- Nível 2: é composto pelos computadores que fazem a supervisão dos equipamentos, contendo a unidade de controle central, juntamente com uma IHM,
- Nível 3: é onde ocorre a operação das subestações a distância, geralmente denominado Centro de Operações do Sistema (COS).

Figura 15: Esquema dos níveis de automação em uma subestação



Fonte: SONALDO [2009], Trabalho de Conclusão de Curso – UFCG, SISTEMA DE SUPERVISÃO, CONTROLE E PROTEÇÃO DA SUBESTAÇÃO ELEVADORA UTE MURICY I.

5. Projeto de um sistema de proteção

Antes de se iniciar a elaboração de um projeto de proteção de uma subestação é necessário analisar-se diversos fatores do sistema, tais como: cargas, curtos circuitos, etc. Depois disso é preciso identificar quais proteções utilizar, quais funções necessárias aos elementos do sistema, quais equipamentos precisam de proteção, etc. Feito isso, é possível definir os dispositivos que devem ser utilizados para executar as funções desejadas, bem como identificar as características desses dispositivos. Com essas informações em mãos, deve se iniciar a criação dos projetos funcional, de fiação e de interligação.

Para o desenvolvimento desses projetos é necessário que o projetista possua os desenhos dos circuitos de cada equipamento de campo, o diagrama unifilar da subestação e a identificação dos equipamentos da casa de comando.

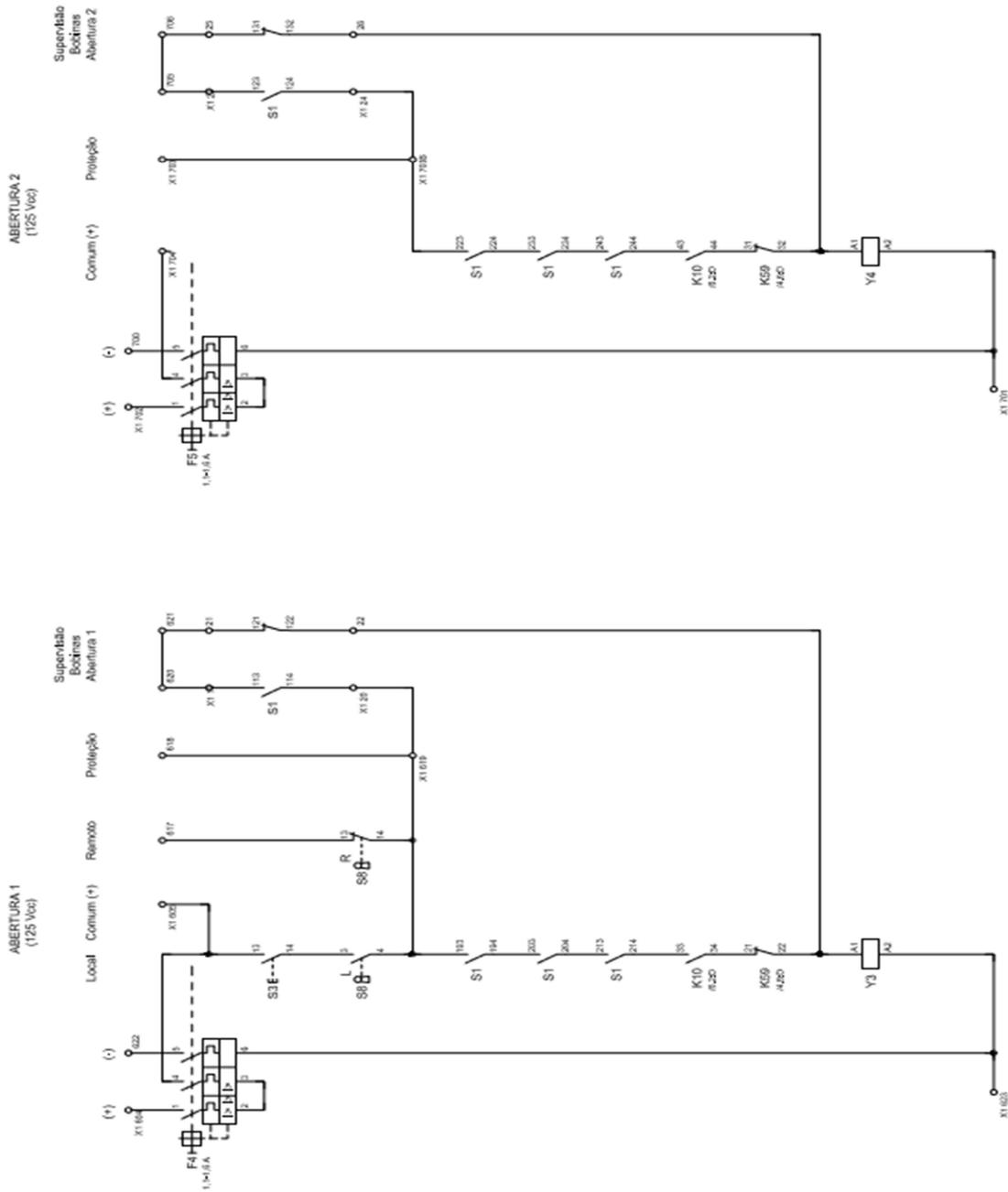
5.1. Projeto Funcional

A elaboração de um projeto funcional compreende a parte mais refinada dos projetos de proteção, pois nele aparece toda a subestação em seus mínimos detalhes. Nestes projetos estão presentes o diagrama de cada equipamento individualmente, detalhando as numerações de seus bornes e suas interligações com os equipamentos, painéis e linhas. Nele está presente todas as lógicas do sistema que está sendo controlada.

Os circuitos dos diagramas esquemáticos são separados por função, como: circuito de abertura, circuito de fechamento, circuitos de alimentação de disjuntores, circuitos de unidades de controle, circuitos dos relés de proteção, dentre outros. Todos os detalhamentos possuem indicações quanto as ligações que se darão em continuidade com os de outras folhas do diagrama.

A figura 16 está mostrando o diagrama funcional de um dos disjuntores utilizados na SE Imbiribeira, que mostra a lógica para abertura local e remota, proteção e supervisão das bobinas de abertura do disjuntor.

Figura 16: Diagrama funcional dos disjuntores de 69kV da SE Imbiribeira



Fonte: Projeto funcional da SE Imbiribeira

5.2. Projeto de Fiação

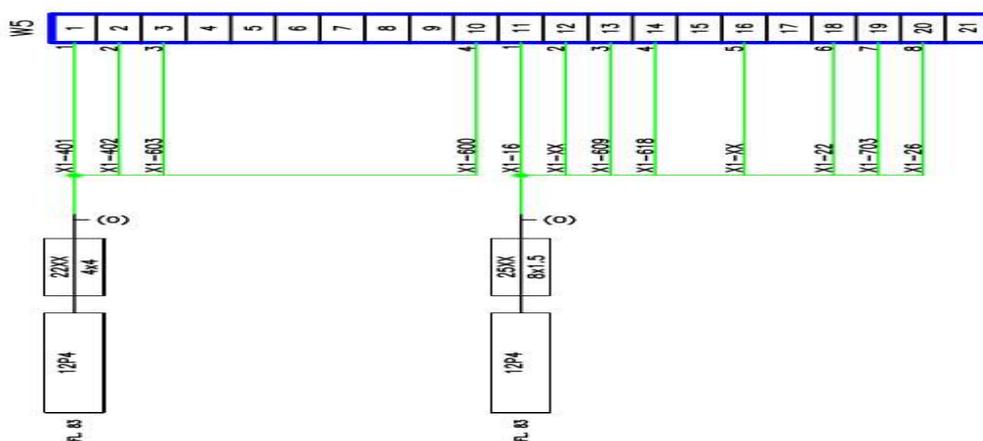
Através do projeto funcional dos equipamentos, é possível construir o projeto de fiação que mostra como deve ser feita a instalação dos equipamentos de proteção e controle nos painéis que ficam na casa de comando. Neste projeto se encontra o desenho do painel que mostra como é feita a montagem do painel, onde cada equipamento deve ser instalado e como deve ser feita a conexão dos fios para que a lógica desejada seja atendida. A lista de material com os equipamentos como relés, disjuntores, relés auxiliares, régua de borne, etc. também são apresentadas nesse projeto.

5.3. Projeto de Interligação

É a representação em desenhos da fiação de toda a obra, indicando de onde vem e pra onde vai cada cabo, a ligação dos painéis com os equipamentos de pátio ou com os outros painéis, onde deve ser conectado cada veia do cabo e a quantidade e a bitola dos fios.

Para que o diagrama de interligação seja projetado corretamente, é necessário que os projeto funcionais dos painéis de proteção e controle e dos painéis dos equipamentos de campo esteja em sintonia perfeita.

Figura 17: Parte de um projeto de Interligação



Fonte: Projeto de Interligação da SE Imbiribeira

5.4. Execução do projeto

O processo de construção ou ampliação de uma subestação inicia-se com as obras civis como construção de bases para equipamentos, construção da casa de comando, instalação de malha de terra, construção de muros, canaletas, caixa separadora de óleo, etc. Em seguida é necessário a montagem de equipamentos, montagem de barramentos, instalação de postes, etc. Após concluídas as etapas de obras civis e montagem, inicia-se a execução do projeto de medição, proteção, comando e controle (MPCC) que possui diversas etapas, tais como:

- Lançamentos de cabos: Com os projetos em mãos, o primeiro passo é o lançamento de cabos, no qual utiliza-se o projeto de interligação que indicará a espessura do cabo, a quantidade de veias, a espessura dos fios e o caminho que cada cabo deve percorrer. O lançamento de cabos deve ser feito através das canaletas construídas e inseridos nos equipamentos e painéis através de tubulações.

Antes do lançamento, deve ser feita uma inspeção para verificar se existem arestas e detritos que possam danificar os cabos. Os cabos precisam ser puxados em lances inteiros, sem emendas entre caixas de passagem, simultaneamente por circuito, pelos condutores, de forma contínua e com tensão constante até que a passagem se processe totalmente.

Na figura 16, segue a imagem de cabos lançados pela canaleta após a inspeção da mesma.

Figura 18: Cabos lançados na canaleta



Fonte: Próprio Autor

Cada cabo deve conter seus respectivos TAGS, que são etiquetas pré-definidas para cada cabo. Como mostrado na figura 17:

Figura 19: Cabos com seus respectivos TAGS



Fonte: Próprio Autor

- Interligação: Após os cabos estarem dentro dos equipamentos, os cabos são decapados para que somente as veias entrem no painel. Deve-se colocar em cada fio, o terminal indicado, de acordo com a espessura do fio, e a luva cristal para a inserção das anilhas. Os fios são interligados

também seguindo o diagrama de interligação que indicará a posição que cada veia do cabo deverá ser conectada para o correto funcionamento do sistema. Para a interligação da fiação externa ao painel com a interna utilizamos bornes que são classificados com base na bitola máxima do fio a ser conectado a ele.

- Anilhamento: As anilhas são indicações que devem ser colocadas em todos os fios mostrando o ponto de saída e o ponto de chegada de cada fio.

Figura 20: Fios anilhados e interligados aos bornes no painel



Fonte: Próprio Autor

6. Comissionamento

Antes do iniciar o funcionamento de fato da subestação é necessário realizar testes para garantir que cada equipamento esteja funcionando de acordo as necessidades e requisitos operacionais. Esta é a última parte para a aplicação do projeto de proteção de uma subestação, chamada de comissionamento. Estes testes são conhecidos como testes de aceitação em campo (TAC).

Para o início dos testes é necessário que todas as interligações entre painéis e equipamentos e entre os próprios painéis estejam finalizadas e de acordo com o projeto de interligação. É necessário também que os painéis e equipamentos estejam montados de forma correta e estejam funcionando perfeitamente, isso deve ser garantido nos testes de aceitação de fábrica (TAF), onde são verificadas a fiação interna dos painéis, a parametrização da proteção, a integração do sistema digital, protocolos de comunicação, lógicas e intertravamentos, etc.

6.1. Teste de aceitação de campo

Inicialmente é necessário ligar os painéis para garantir que estejam sendo alimentados corretamente, sem nenhum curto. Após essa etapa, são realizados os testes de funcionalidade, que garantem que o que está implementado no diagrama funcional está sendo atendido em campo, dentre eles podemos citar: testes de abertura ou fechamento de disjuntor no comando local, teste da chave Local/Remota, teste do comando de abertura ou fechamento através do relé, religamento automático, dentre outras. As lógicas de proteção, comando e controle também são testadas e tudo é confirmado para observar se não há nenhuma atuação indevida.

Na figura 19 é mostrado o local no painel do disjuntor onde é dado o acionamento manual do mesmo e a chave onde é possível mudar o seu

acionamento de local para remoto, para que sua atuação seja dada através do comando de abertura do relé.

Figura 21: Botoeiras para comando local e chave Local/Remota do disjuntor 69kV



Fonte: Próprio Autor

A próxima etapa são os testes de proteção, que verificam se a proteção está sensibilizada de forma correta em relação as diversas faltas do sistema elétrico e se as funções que são disponibilizadas pelo fabricante e as parametrizadas pelo projetista estão funcionando perfeitamente. Para os testes de algumas das funções dos relés são injetadas correntes ou tensões nos secundários dos TCs e TPs, respectivamente, através de um equipamento injetor, para simular correntes e tensões de falta e assim testar se os relés estão atuando nos valores pré-definidos para sua atuação em funções, por exemplo, de sobrecorrente ou sobretensão, Ao injetar essas correntes e tensões, é necessário verificar se os medidores estão mostrando os valores corretos.

A figura 22 mostra o equipamento injetor SMC Raptor, utilizado equipe da CELPE para injetar corrente no secundário dos TCs para realizar alguns testes no comissionamento.

Figura 22: Equipamento injetor SMC Raptor injetando corrente no secundário do TC



Fonte: Próprio Autor

Se o objetivo, por exemplo, for ver a posição das chaves seccionadoras, basta abrir ou fechar a mesma no campo e verificar se a posição está batendo com o do sistema supervisor.

6.2. Energização

A energização é o momento que se inicia a operação da subestação. Antes da energização, todas as obras que envolvem os circuitos elétricos a serem energizados devem ser concluídas e a área deve ser limpa e todos os equipamentos desnecessários bem como pessoas não envolvidas no processo de energização devem ser retirados.

Para a energização ocorrer, todos os órgãos e empresas envolvidas no empreendimento marcam uma data para estarem com equipes presentes na SE ou monitorando o sistema remotamente, principalmente as outras subestações que estarão interligadas a SE nova. Essa data costuma ser em um final de semana, para minimizar os danos de um possível desligamento.

No momento da energização, todos os testes do sistema de proteção, controle e supervisão já estão obrigatoriamente finalizados, mas os primeiros dias da subestação energizada são utilizados para reafirmar testes como medição de corrente, tensão e potência.

7. Conclusão

Devido a tamanha importância dos sistemas de proteção para os sistemas elétricos, fica claro que automatização desse processo é bastante desejável. Como foi mostrado, os relés microprocessados possuem diversas vantagens em relação aos relés eletromecânicos, tanto economicamente, quanto tecnicamente.

Além disso, desenvolver conhecimentos práticos sobre obras, aprendendo a analisar os projetos é de fundamental importância para os engenheiros eletricitistas. Por isso, foi mostrado como é feito o processo de execução do projeto de proteção de uma subestação, tendo em vista que uma das funções do engenheiro será supervisionar a execução da obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DE MELLO, F. P.. Proteção de sistemas elétricos de potência Proteção de sistemas elétricos de potência. 2ª Edição. Volume 7. Rio Grande do Sul: UFSM, 1983. >. Acesso em: 28/02/2018.
- [2] BALTAR, Francisco. Características e funções das SE's no sistema elétrico Características e funções das SE's no sistema elétrico. Eletrobrás, UFPE, ATEPE. >. Acesso em: 28/02/2018.
- [3] COURY, D.V. Introdução aos Sistemas Elétricos de Potencia. Universidade de São Paulo Escola de engenharia de São Carlos, 2007. >. Acesso em: 01/03/2018.
- [4] SALIM, Thiago Messias Barata. Automação Industrial e a Integração dos Sistemas Digitalizados de Proteção, Controle e Supervisão de Subestações de Energia Elétrica– 2007. Trabalho de graduação da Escola Politécnica da UFRJ. >. Acesso em: 01/03/2018.
- [5] MAMEDE, J. – Sistemas Elétricos Industriais 5ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Ltda, Rio de Janeiro, 1997. >. Acesso em: 02/03/2018.
- [6] PETROBRÁS, Petrobrás Brasileiro S.A. – Procedimento de Projeto de Subestações ,1985; >. Acesso em: 03/03/2018.
- [7] KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Volume 1, 1 edição, 1999 >. Acesso em: 05/03/2018.
- [8] FILHO, João Mamede. Manual de Equipamentos Elétricos. Volume 1. 2ª Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, 1994. >. Acesso em: 07/03/2018.
- [9] GIGUER, S. Proteção de sistemas de Distribuição. Porto Alegre: editora Sagra. 1ª edição,1988. >. Acesso em: 08/03/2018

