



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODERNIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO
COM A UTILIZAÇÃO DOS RELÉS DIGITAIS
(CASO PRÁTICO LT-04S1 – CHESF)**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
POR**

JOÃO PEDRO BEZERRA SAMPAIO

Orientador: Prof. Zanoni Dueire Lins

RECIFE, AGOSTO / 2014

JOÃO PEDRO BEZERRA SAMPAIO

**MODERNIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO
COM A UTILIZAÇÃO DOS RELÉS DIGITAIS
(CASO PRÁTICO LT-04S1 – CHESF)**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a conclusão do Curso de Engenharia Elétrica de João Pedro Bezerra Sampaio
Professor Orientador: Dr. Zanoni Dueire Lins.

RECIFE, PERNAMBUCO
AGOSTO DE 2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S192m Sampaio, João Pedro Bezerra.
Modernização de sistemas de proteção com a utilização dos relés digitais (caso prático LT-04S1-CHESF) / João Pedro Bezerra Sampaio. - Recife: O Autor, 2014.
44 folhas + anexos; il., tabs.

Orientador: Prof. Zanoni Dueire Lins.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.
Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Relés na proteção de um sistema elétrico de potência. I. Lins, Zanoni Dueire (Orientador). II. Título.

621.3 CDD (22. ed.) UFPE/BCTG/2014-218

Aos meus avós (eternos pais) e minha mãe
Às minhas tias
À minha namorada

AGRADECIMENTOS

Ao Pai, ao Filho e ao Espírito Santo, pois foi a Eles que recorri nas horas de cansaço, sempre pedindo forças.

Aos meus avós (eternos pais), à minha mãe, e às minhas tias e tios pelas orações de proteção e pelo apoio quando mais precisei.

À minha namorada, companheira ideal e pessoa fundamental em minha vida que com suas palavras de constante incentivo e seus gestos de carinho me acalmava.

Ao Doutor Professor Zanoni, que com seus conhecimentos me ajudou a ter uma visão melhor da engenharia elétrica.

A todos os professores e colegas do curso de Engenharia Elétrica pelo convívio e aprendizado.

Ao final agradeço à Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) em subsidiar todo o material necessário para realização deste Trabalho de Conclusão de Curso, muito importante na minha formação acadêmica.

“Fácil é abraçar, apertar as mãos, beijar
de olhos fechados.

Difícil é sentir a energia que é transmitida.
Aquela que toma conta do corpo como uma
corrente elétrica quando tocamos a pessoa certa.”

Carlos Drummond de Andrade

RESUMO

A energia elétrica é de suma importância para o bem estar da sociedade, por isso, o sistema elétrico vem passando por diversas transformações e investimentos visando as suas melhorias. Um desses investimentos é na digitalização do sistema como um todo, e especificamente nas suas proteções. O relé realiza papel fundamental na proteção de um sistema elétrico de potência. Inicialmente, serão descritos os relés eletromecânicos e, em seguida, relés digitais que os substituíram. Para efeito de comparação serão mostradas as vantagens e desvantagens de ambos os tipos de relés. Será apresentado o processo de modernização, através da digitalização, do sistema de proteção da linha de transmissão – 04S1 com terminação na Subestação de Juazeiro II da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). Este processo será ilustrado com fotos e diagramas funcionais.

Palavras-chave: Proteção. Relé eletromecânico. Relé digital. Modernização do sistema de proteção. Linha de transmissão – 04S1 da Subestação de Juazeiro II.

ABSTRACT

Electricity is of paramount importance to the welfare of society, therefore, the electrical system has undergone several changes and investments to their improvements. One such investment is the scanning system as a whole, and specifically in its protections. The relay performs a fundamental role in protecting an electrical power system. Initially, we describe the electromechanical relays and then digital relays that have replaced them. For comparison will show the advantages and disadvantages of both types of relays. The modernization process will be presented, through digitization, the protection system of the transmission line - 04S1 terminating in Juazeiro Substation II Hydroelectric Company of San Francisco (CHESF). This process will be illustrated with photos and diagrams functional.

Keywords: Protection. Electromechanical relay. Digital relay. Modernization of the protection system. Drivetrain - 04S1 Juazeiro II Substation

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO	12
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2. RELÉ ELETROMECAÂNICO	13
2.1. RELÉ ELEMENTAR ELETROMECAÂNICO	13
2.2. RELÉ ELETROMECAÂNICO – RELÉ DO TIPO THR E RELÉS AUXILIARES	14
2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS RELÉS ELETROMECAÂNICOS 18	18
3. RELÉ DIGITAL	19
3.1. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DO RELÉ DIGITAL 19	19
3.2. CARACTERÍSTICAS DO RELÉ DIGITAL SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES (SEL-421)	20
3.3. FUNÇÕES DO RELÉ SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES - SEL-421	21
3.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS RELÉS DIGITAIS	25
4. APLICAÇÃO NO CASO PRÁTICO: LINHA DE TRANSMISSÃO – 04S1 DA SUBESTAÇÃO DE JUAZEIRO II	27
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO	27
4.2. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO ANTES DA MODERNIZAÇÃO	29
4.3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO APÓS A MODERNIZAÇÃO	32
4.4. Teste de Funcionalidade da Proteção após a Modernização	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relé eletromecânico elementar	14
Figura 2.2 - Parte frontal do módulo do Relé THR, Reyrolle	15
Figura 2.3 - Relé direcional de sobrecorrente de Neutro (67N), Reyrolle	16
Figura 2.4 - Relé de Religamento (79), Westinghouse.....	17
Figura 2.5 - Relé de Sobretenção (59), Reyrolle	17
Figura 3.1- Vista frontal do Relé SEL-421	21
Figura 3.2 - Diagrama de funcionalidades do Relé SEL-421.	22
Figura 4.1 - Sistema Elétrico no Estado da Bahia (SE Juazeiro II)	27
Figura 4.2 - Unifilar Geral da Subestação de Juazeiro II	28
Figura 4.3 - Foto frontal do Chassi CP1.....	29
Figura 4.4 - Foto frontal do Chassi CP2.....	30
Figura 4.5 - Foto frontal do Chassi CP3.....	31
Figura 4.6 - Foto frontal do Chassi PC2.....	31
Figura 4.7 - Entrada analógica de Tensão e Corrente da proteção UP1.	33
Figura 4.8 - Entradas digitais da UP1.	36
Figura 4.9 - Entradas digitais da UP2.	37
Figura 4.10 - Diagrama Unifilar.....	38
Figura 4.11 - Distribuição de Potencial 125 Vcc.....	39
Figura 4.12 – Lógica de Falha de disjuntor	40
Figura 4.13 – Caixa de Teste Omicron.....	41
Figura 4.14 – Diagrama Fasorial	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	- <i>American National Standards Institute</i>
CHESF	- Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente contínua
Celpe	- Companhia Energética de Pernambuco
Coelba	- Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
CP1	- Chassi de Proteção um
CP2	- Chassi de Proteção dois
CP3	- Chassi de Proteção três
Fe	- Força elétrica
Fm	- Força mecânica
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
khz	- quilohertz
kv	- quilovolt (1.000 V)
I_a	- Corrente de atuação, de <i>pickup</i> , de acionamento ou operação de relé
I_{op}	- Corrente de operação
IRIG	- <i>Inter Range Instrumentation Group</i>
LDF	- Localizador de faltas
NA	- Normalmente aberto
NF	- Normalmente fechado

NOS - Operador Nacional do Sistema

OPGW - *Optical Ground Wire*

PC2 - Painel de Comando dois

SEL - *Schweitzer Engineering Laboratories*

SEPs - Sistemas Elétricos de Potência

UP1 - Unidade de proteção um

UP2 - Unidade de proteção dois

V - Tensão

Z - Carga

1. INTRODUÇÃO

Não há dificuldade em perceber que na conjuntura atual há necessidade em analisar a confiabilidade do sistema elétrico brasileiro, devido as constantes falhas que vêm acontecendo nos últimos anos, e para contornar esse fato são necessários significativos investimentos. Um desses investimentos é na modernização do sistema elétrico como um todo - através da digitalização - e especificamente, nos sistemas de proteção.

O relé é um dos componentes principais do sistema de proteção. Partindo desse pensamento, utilizando-se aqui, com superficialidade a seguinte definição, o relé é, basicamente, um sensor que pode monitorar sinais de tensão, corrente, frequência, etc. Eles evoluíram historicamente desde os relés eletromecânicos, relés estáticos até chegar aos relés digitais. Contudo, o presente trabalho não se aprofundará em esclarecimentos sobre tais definições, e sim, apenas os citou para poder fazer uma ponte de ligação entre a sua utilização e aplicação no caso prático que será explanado no decorrer do trabalho.

A importância da evolução histórica ocorre pelo do sistema elétrico de potência requerer - cada vez mais - seletividade, velocidade e confiabilidade. E para atender a esses requisitos a proteção precisa acompanhar o desenvolvimento do sistema elétrico. Dessa maneira, as antigas proteções eletromecânicas vêm aos poucos sendo substituídas pelas proteções digitais, permitindo atuações mais velozes, seletivas e confiáveis.

Será apresentado o processo de modernização com a digitalização do sistema de proteção da linha de transmissão-04S1 com terminação na Subestação de Juazeiro II, pertencente a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) onde serão ilustradas com fotos e diagramas funcionais de tal forma a permitir que os diversos pontos dos diversos equipamentos (de potência e de proteção) possam ser facilmente identificados.

1.1. OBJETIVO

Em linhas gerais, o objetivo desse trabalho é abordar tanto os relés eletromecânicos, como os relés digitais e sem seguida, caracterizar a modernização do sistema de proteção, através da aplicação no caso prático da substituição dos relés da Linha de Transmissão - 04S1 com terminação na Subestação de Juazeiro II, pertencente a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido de acordo com as considerações abaixo:

No segundo capítulo apresentam-se as diversas características do relé eletromecânico anteriormente presente, resumindo tanto a função do relé elementar eletromecânico, quanto o relé eletromecânico do tipo THR, fabricante Reyrolle e outros tipos de relés auxiliares; abordando, ainda, as vantagens e desvantagens desses relés eletromecânicos.

No terceiro capítulo será estudado o relé digital, seu desenvolvimento histórico e sua evolução. Seguidamente, ocorrerá a explanação das principais características do relé digital *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL-421), e suas funções, onde será finalizado com as vantagens e desvantagens desse relé digital muitas vezes frente ao relé eletromecânico..

No quarto capítulo, será feita a aplicação no caso prático da substituição dos relés da Linha de Transmissão - 04S1 com terminação na Subestação de Juazeiro II, pertencente a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). A caracterização, a configuração do sistema de proteção antes e após a modernização serão amplamente apresentados neste estudo de caso- Ressalta-se que para a compilação deste trabalho foi feito o uso de livros, manuais, fotos e diagramas funcionais fornecidos pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).

2. RELÉ ELETROMECAÂNICO

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o relé é um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento ou do circuito em que ele está ligado, ou em outro equipamento ou circuito associado.

O relé eletromecânico é um tipo de relé no qual sua operação ocorre através de movimentos mecânicos, fazendo o uso da conversão eletromagnética.

Este capítulo trata do relé eletromecânico de forma sucinta. Inicialmente será apresentado o funcionamento do relé, através do relé eletromecânico elementar. Por fim, é caracterizado o relé eletromecânico do tipo THR, do fabricante Reyrolle e alguns dos relés auxiliares, de forma a ajudar na caracterização do caso prático, que será feito no capítulo 4.

2.1. RELÉ ELEMENTAR ELETROMECAÂNICO

Quanto ao tipo construtivo, os relés eletromecânicos podem ser classificados em relés de armadura axial, tração eletromagnética, armadura em charneira, disco de indução, entre outros.

Dado o circuito, mostrado na Figura 2.1, tem-se uma fonte de tensão (V), alimentando uma carga (Z), do que resulta uma corrente (I), sendo introduzido um relé elementar, do tipo eletromecânico: uma estrutura em charneira, composta de um núcleo fixo e uma armadura móvel na qual estão solitários o contato móvel e uma mola, que faz como que o circuito magnético fique aberto em uma posição regulável. O núcleo é percorrido por um fluxo proporcional a corrente do circuito, circulando na bobina do relé, sendo possível que o contato móvel feche um circuito operativo auxiliar (fonte de corrente contínua, nesse caso), alimentando um alarme (lâmpada) e/ou o disparador do disjuntor colocado no circuito principal, sempre que força elétrica (F_e) > força mecânica (F_m) [1,2].

O valor da corrente (I) deve ser limitado, por motivos de projeto e assim, sempre que excede um valor prefixado I_a (denominado corrente de atuação, de *pickup*, de acionamento ou operação de relé), o circuito deve ser interrompido,

por exemplo, pelo fornecimento de um impulso de operação (I_{op}) enviando à bobina do disparador do disjuntor, ou ser assinalada por um alarme (lâmpada, buzina) [1,2].

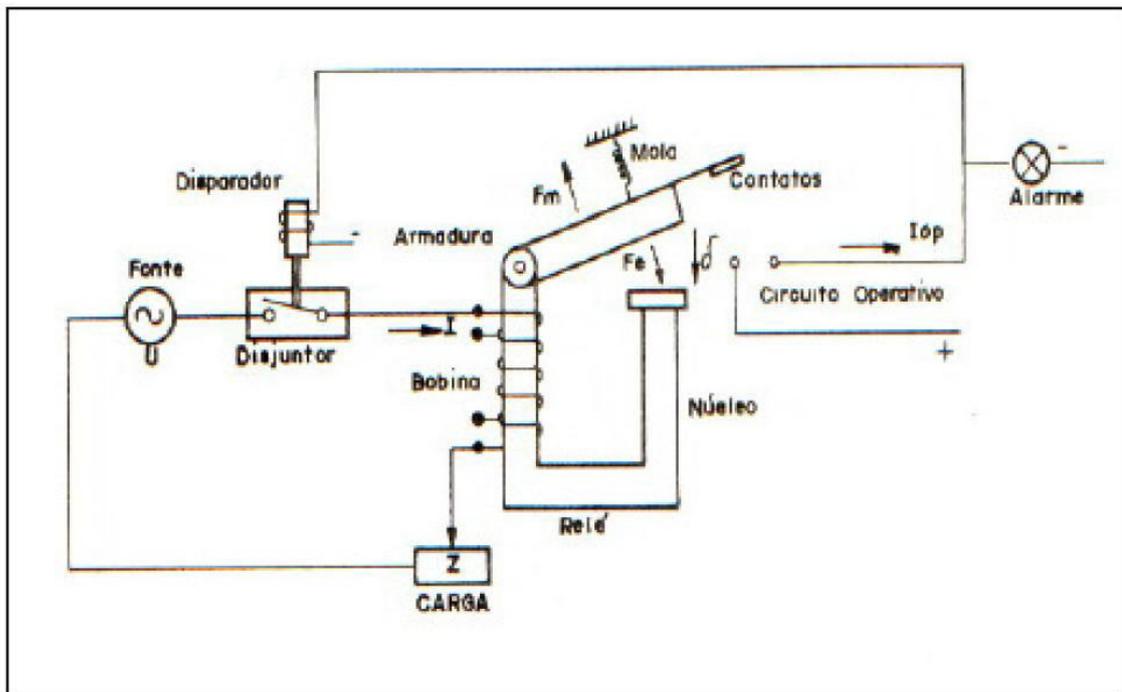


Figura 2.1 - Relé eletromecânico elementar
Fonte: Caminha (1977, p.13)

2.2. RELÉ ELETROMECAÂNICO – RELÉ DO TIPO THR E RELÉS AUXILIARES

Como exemplo de proteção eletromecânica tem-se o Relé do tipo THR da marca Reyrolle que tem como sua principal função a de relé de distância sendo um esquema de proteção totalmente integrado.

O relé THR é capaz de acomodar uma ampla gama de módulos. Os módulos incluem até quatro zonas de proteção com várias formas e características, apresentam diferenças em relação aos relés eletromecânicos tradicionais, dado à presença de funções adicionais como a supervisão e bloqueio de oscilação de potência.

Sabe-se que há inúmeras variantes disponíveis na proteção THR, para utilizá-la há recomendações operacionais necessárias, tanto de caráter geral, como as apresentadas em termos de módulos individuais. A seleção e

utilização dos módulos escolhidos dentro de um regime especial podem variar dependendo das necessidades [3].

As zonas de proteção de distância presentes no relé THR, Reyrolle apresentam as seguintes características, seguindo o ajuste típico da CHESF:

- Zona 1: alcance de 80% da linha e temporização instantânea;
- Zona 2: alcance de 120% da linha, isto é, cobre toda a linha mais 20% da linha remota. Temporização de 400ms;
- Zona 3: alcance de 150% e ajuste de tempo de 800ms;
- Zona 4: é a zona reversa e deve cobrir a zona 2 do terminal remoto, ou seja, pouco mais de 20% da linha para trás. A temporização usada é de 1s.

A Figura 2.2 apresenta foto do módulo do relé THR, Reyrolle que protegia a Linha de Transmissão - 04S1 com terminação na Subestação de Juazeiro II da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).

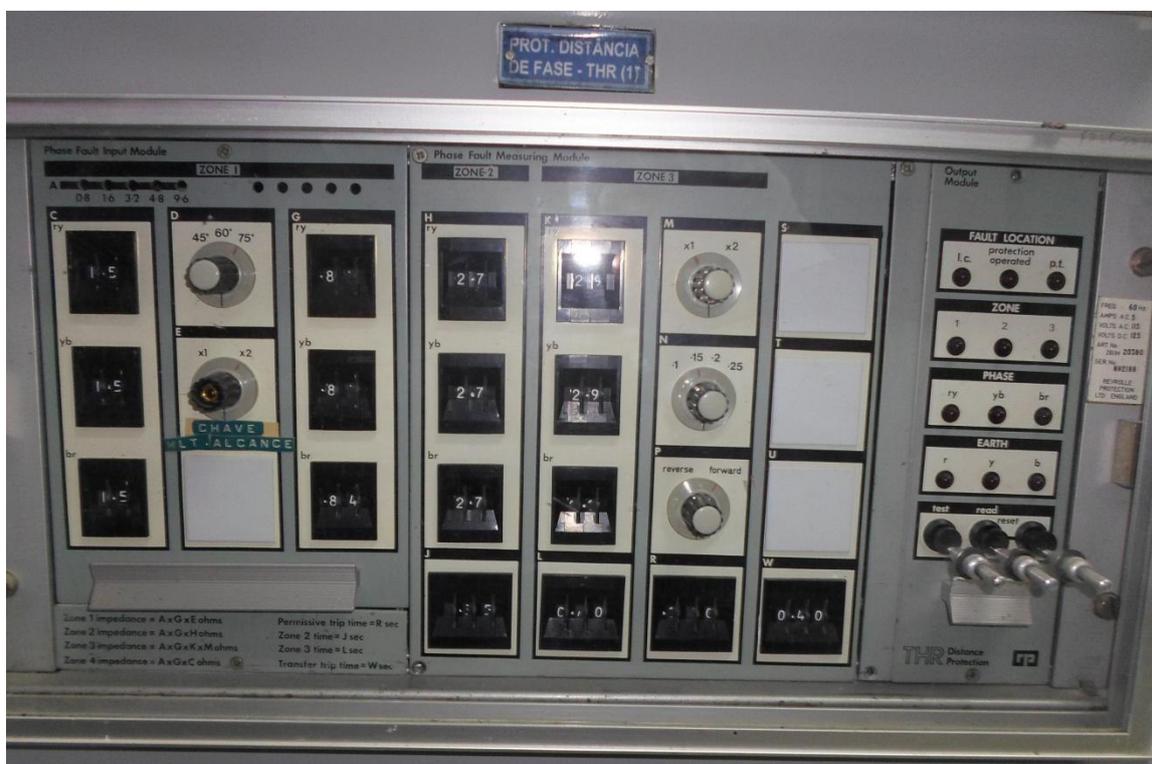


Figura 2.2 - Parte frontal do módulo do Relé THR, Reyrolle
Fonte: CHESF

Para a proteção da linha de transmissão e das linhas de transmissão a montante e a jusante, além da proteção de distância, também conhecida como

proteção 21 pela norma *American National Standards Institute (ANSI)*, são necessários relés auxiliares para que a proteção da linha seja executada de forma correta. Nesse sentido, seguem alguns tipos de relés auxiliares e suas respectivas funções:

- Relé direcional de sobrecorrente de Neutro (67N): o relé comanda o fechamento do disjuntor para uma corrente maior que o valor de *pick-up* em uma direção pré-estabelecida. Existe também a função sobrecorrente de neutro 67N, que é sensibilizada pela corrente de sequência zero. A Figura 2.3 apresenta foto do relé direcional de neutro também da marca Reyrolle do tipo TJM10.



Figura 2.3 - Relé direcional de sobrecorrente de Neutro (67N), Reyrolle
Fonte: CHESF

- Relé de religamento (79): Relé que tem como função executar o fechamento do disjuntor após a abertura para eliminar uma falta. Segue, abaixo, o relé de religamento da marca *Westinghouse* na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Relé de Religamento (79), Westinghouse.
Fonte: CHESF**

- Relé de Sobretensão (59): São relés que operam quando a tensão do sistema ultrapassa um valor preestabelecido ou ajustado, segue abaixo o relé da marca Reyrolle do tipo TEB1, na Figura 2.5, que mostra a sua parte frontal.



**Figura 2.5 - Relé de Sobretensão (59), Reyrolle
Fonte: CHESF**

2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS RELÉS ELETROMECAÂNICOS

As principais vantagens dos relés eletromecânicos são:

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

Algumas das desvantagens são:

- **Custo da instalação** - uso de maior espaço físico.
- **Manutenção** - devido ao processo de substituição desses relés está existindo dificuldades em encontrar peças de reposição.
- **Limitação de funcionamento** – não é possível implementar características acessórias adequadas para enfrentar a crescente complexidade do sistema elétrico de potência, inclusive com o armazenamento de dados (como por exemplo, oscilografia).
- **Não permite funções de proteção integradas** – cada relé eletromecânico tem a sua função específica.
- **Desgaste mecânicos dos contatos** - os contatos de um relé sofrem um *stress* mecânico inerente à sua movimentação.

3. RELÉ DIGITAL

Relés digitais são relés eletrônicos microprocessados que fazem uso da conversão analógica-digital (Conversor A/D) para o seu funcionamento, porém normalmente o princípio de operação se fundamenta na função do relé eletromecânico associado.

Este capítulo aborda os relés digitais, começando com seu desenvolvimento histórico e, logo em seguida, é feita a caracterização do relé da SEL-*Schweitzer Engineering Laboratories* do tipo 421 que será utilizado no novo sistema de proteção associado a Linha de Transmissão 04S1 com terminação na Subestação de Juazeiro II.

3.1. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DO RELÉ DIGITAL

O surgimento dos relés digitais está atrelado à criação de ferramentas de análise computacionais nas áreas de sistemas de potência para o cálculo de curto-circuito, fluxo de carga e estabilidade que teve início em meados da década de 60 [4].

A aplicação da tecnologia digital em relés de proteção seria o próximo passo promissor. No entanto, essa aplicação era onerosa computacionalmente na década de 60, dado que o relé digital explorava a ideia de que a proteção de vários equipamentos em uma subestação de energia deveria ser manipulada por um único computador [4].

Fato da mesma época que contribuiu para os relés digitais foi, o desenvolvimento de algoritmos para a proteção de distância de linha de transmissão de alta tensão. O estudo na área de linha de transmissão despertou a atenção de vários pesquisadores da época pelo uso indiscriminado nos sistemas elétricos, alto custo e complexidade de funcionamento [4].

Com os avanços significativos no *hardware* computacional o tamanho do consumo de potência e custo dos computadores diminui, enquanto que ao

mesmo tempo a velocidade processamento mais que dobrou, sendo assim, foi possível a implantação dos relés digitais [4].

Na atualidade, a grande maioria dos novos projetos de subestações faz o uso da tecnologia digital. E o relé de proteção eletromecânico e de estado sólido, em subestações antigas vem aos poucos sendo substituídos por modernos relés digitais e o seu desenvolvimento não para de crescer dada a implementação de novos *hardware e software* [4].

3.2. CARACTERÍSTICAS DO RELÉ DIGITAL *SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES* (SEL-421)

O relé digital *Schweitzer Engineering Laboratories* - SEL-421 tem como principal finalidade a proteção e lógicas de controle para proteger linhas de transmissão aéreas e cabos subterrâneos.

O sistema de proteção, controle e automação do relé SEL-421 combina a proteção distância medindo simultaneamente cinco zonas de proteção de admitância de fase e terra e cinco zonas de proteção de distância de terra quadilateral e a proteção direcional de alta velocidade seleção de fases em falta e distância de alta velocidade, são aplicados em esquemas de proteção de distância com zonas temporizadas e esquemas de teleproteção além de poder adaptar o relé de acordo com sua aplicação, usando equações de controle [5].

A Figura 3.1 apresenta foto com a vista frontal do relé *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL-421).



Figura 3.1- Vista frontal do Relé SEL-421
 Fonte: Data Sheet SEL-421-4,5

3.3. FUNÇÕES DO RELÉ SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES - SEL-421

O relé digital SEL-421 tem várias funções e, pode ser programado de acordo com suas finalidades. A seguir são apresentadas as diversas funções do relé da Schweitzer Engineering Laboratories (SEL-421):

- **Funções de Proteção:**

Diferente do relé eletromecânico que apresentava um equipamento para cada função, o relé digital pode desempenhar todas as funções em um único equipamento. O relé SEL-421 pode desempenhar as proteções mostradas na Figura 3.2, onde são especificados os números de dispositivos associados com a proteção e controle disponível, juntamente com uma lista de controles padrão e os recursos opcionais de comunicação permitidas por este relé.

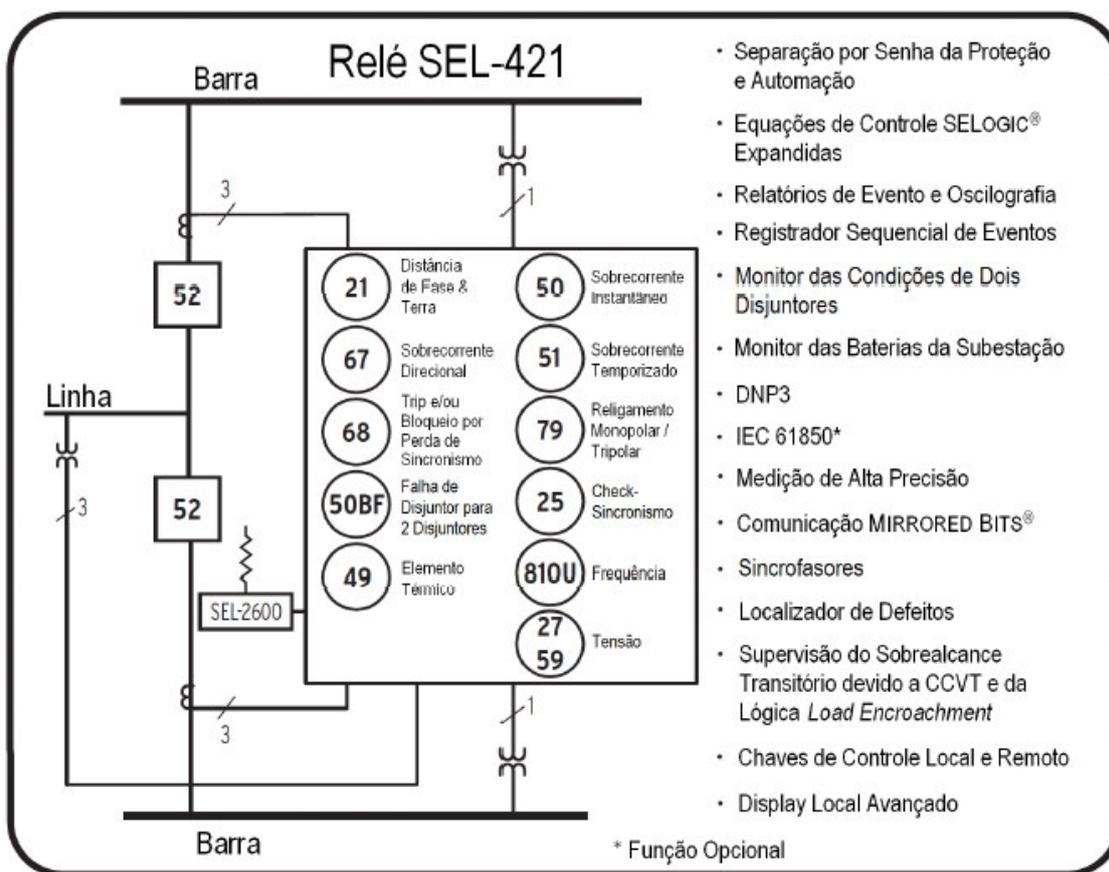


Figura 3.2 - Diagrama de funcionalidades do Relé SEL-421.
Fonte: Data Sheet SEL-421-4,5

- 50/51 Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51G Sobrecorrente residual instantânea e temporizada;
- 50/51Q (46) Sobrecorrente instantânea e temporizada de seqüência negativa;
- 21 Distância de fase, cinco zonas tipo mho e cinco zonas tipo quadrilateral;
- 21G Distância de neutro, cinco zonas tipo mho e cinco zonas tipo quadrilateral;
- 67G Sobrecorrente direcional de neutro (polarizado por corrente e tensão);
- 67Q direcional de seqüência negativa (polarizado por tensão);
- 85 Esquemas de controle ou teleproteção (PUTT, POTT, DCUB, DCB, DTT, etc. ou lógica programável);
- 78/68 Disparo e bloqueio por oscilação de potência;
- 79 Religamento automático monopolar (2 tentativas) ou tripolar (quatro tentativas) para até dois disjuntores;
- 25 Verificação de sincronismo para até dois disjuntores;
- 27/59 Subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;
- 59G Sobretensão de neutro;

- 59Q Sobretensão de seqüência negativa;
- 50/62BF Falha de disjuntor para até dois disjuntores;
- 60 Perda de potencial;
- 81 Sub/Sobrefreqüência, taxa de variação de freqüência df/dt ;

- **Funções de medição:**

A medição de grandezas elétricas antes era feita exclusivamente por medidores de energia, potência, tensão, corrente, etc. que ficavam em um painel específico. Com o advento dos relés digitais, como por exemplo, o relé SEL-421 o equipamento passou a também desempenhar funções de medição: fazendo medições de grandezas instantâneas de tensão, corrente, potência, energia, etc, conforme apresenta a Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Função de Medição do SEL-421

Capacidades		Descrição
Grandezas Instantâneas		
Tensões	$V_{A,B,C} (Y)$	0-300 V com grandezas de fase para cada uma das seis fontes de tensão disponibilizadas como uma grandeza independente.
	$V_{A,B,C} (Z)$	
	V_{FF}	
	$3V0, V1, 3V2$	
Correntes	$I_{A,B,C} (W)$	Grandezas de fase para cada uma das duas fontes de corrente disponibilizadas como uma grandeza independentes ou combinadas como grandezas de linha.
	$I_{A,B,C} (X)$	
	$I_{AL}, I_{BL}, I_{CL},$ (correntes combinadas)	
	$I_{GL}, I_{1L}, 3I_{2L},$ (correntes combinadas)	
Grandezas de Medição de Potência/Energia		
MW, MWh, MVAR, MVARh, MVA, FP, monofásicos e Trifásicos		Disponível para cada grupo de entradas e como grandezas combinadas para a linha.
Medição de Demanda/ Demanda de Pico		
IA,B,C, 3I2, 3I0		Intervalo de demanda e demanda de pico: térmico
MW, MVAR, MVA, monofásicos		Intervalo de demanda e demanda de pico: térmico

MW, MVAR, MVA, trifásico	Intervalo de demanda e demanda de pico: térmico
--------------------------	---

- **Funções de Monitoramento:**

O monitoramento de grandezas pode ser realizado com a utilização do relé SEL-421. Pode ser feita a oscilografia com frequências de amostragem de 8 kHz (até 6s), 4 kHz (até 9s), 2 kHz (até 12s) ou 1 kHz (até 15s). Tamanho selecionável entre: 0.25s, 0.5s, 1.0s, 2.0s, 3.0s, 4.0s ou 5.0s. Além da oscilografia possui conexão de entrada IRIG-B ao receptor de GPS, garantindo assim, que diversos relés sejam amostrados de forma sincronizada, permitindo assim uma análise sistemática das ocorrências. A sua capacidade de armazenamento chega até a 1000 eventos.

O relé SEL-421 apresenta localizador de faltas (LDF), indicando em km ou % a localização do defeito.

O relé SEL-421 também permite fazer o monitoramento do desgaste dos contatos do disjuntor por pólo e suas bobinas. Também monitora o sistema de alimentação auxiliar corrente contínua (CC), fornecendo alarme para sub ou sobretensão e falha a terra.

- **Funções de Controle e Automação**

Os esquemas de controle são feitos através das equações de controle do *software* do próprio relé SEL-421. É feita a programação das equações de controle que consiste na combinação dos elementos, entradas e saídas do relé. Em relação a comunicação, o SEL-421 apresenta protocolo aberto de comunicação e necessita apenas de terminais ASCII (Comandos em linguagem simples para comunicação homem-máquina. Usado para medição, ajustes, estado da autodiagnose, relatórios de evento e outras funções).

3.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS RELÉS DIGITAIS

Os relés digitais têm inúmeras vantagens na proteção do sistema elétrico de potência, dentre essas vantagens pode-se destacar:

- **Custo:** No início, o custo dos relés digitais era equivalente a de 10 a 20 vezes o custo dos relés convencionais de estado sólidos. O custo dos relés digitais foi drasticamente reduzido ao longo dos anos e sua velocidade de processamento aumentou substancialmente.
- **Confiabilidade e Auto-monitoramento:** O relé digital pode ser programado para monitorar constantemente seus sistemas de *hardware* e *software*, detectando defeitos internos que possa vim a ocorrer. Na ocorrência de um defeito, o relé pode colocar fora de serviço e/ou gerar um alarme ao sistema central. Esta característica é um dos mais importantes argumentos técnicos a favor desses relés.
- **Integração Digital:** os microprocessadores e a tecnologia digital têm se tornado a base da maioria dos sistemas empregados nas subestações. Medições, comunicações de dados, telemetria e controle são praticamente realizados fazendo-se uso da tecnologia digital. Nas subestações modernas, os relés digitais devem estar integrados naturalmente a esses sistemas. Deve ainda ser enfatizado o crescimento da disponibilidade de comunicação via fibra óptica com a crescente utilização dos cabos OPGW (*Optical Ground Wire*) pelas companhias de energia elétrica.
- **Flexibilidade Funcional:** O relé digital pode ser programado para executar diversas funções. Desta forma, pode executar outras tarefas na subestação tais como: medição, monitoramento, controle, localização de faltas, etc. O relé digital pode ainda, como citado, possuir característica adaptativa, modificando sua atuação em várias funções, para torná-las, mais adequada às condições dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs).
- **Possibilidades de Implementação de Técnicas Inteligentes:** a tecnologia digital abre portas para a implementação de ferramentas inteligentes para um melhor desempenho da proteção de sistema

elétricos. Redes neurais artificiais, Lógica *Fuzzy*, algoritmos genéticos são algumas destas ferramentas que podem contribuir para tal finalidade, antes inimaginável considerando os relés convencionais.

Algumas das desvantagens da proteção utilizando os relés digitais:

- **Atualizações:** os *softwares* dos relés avançam rapidamente, tornando-se assim, necessárias as atualizações. Além disso, podendo até se tornarem obsoletos.
- **Vida útil:** O relé digital tem vida útil reduzida se comparado aos relés eletromecânicos.
- **Interferências eletromagnéticas:** Por ser um equipamento eletrônico pode sofrer interferências eletromagnéticas.
- **Necessidade de alimentação**

4. APLICAÇÃO NO CASO PRÁTICO: LINHA DE TRANSMISSÃO – 04S1 DA SUBESTAÇÃO DE JUAZEIRO II

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

A Linha de Transmissão Sobradinho 1 – 04S1, com terminação na subestação de Juazeiro II, é localizada no município de Juazeiro no estado da Bahia. A Subestação Juazeiro II uma subestação da CHESF e faz parte da Gerência Regional de Sobradinho.

A Figura 4.1 apresenta, em destaque, mapa com a localização da Subestação de Juazeiro II.

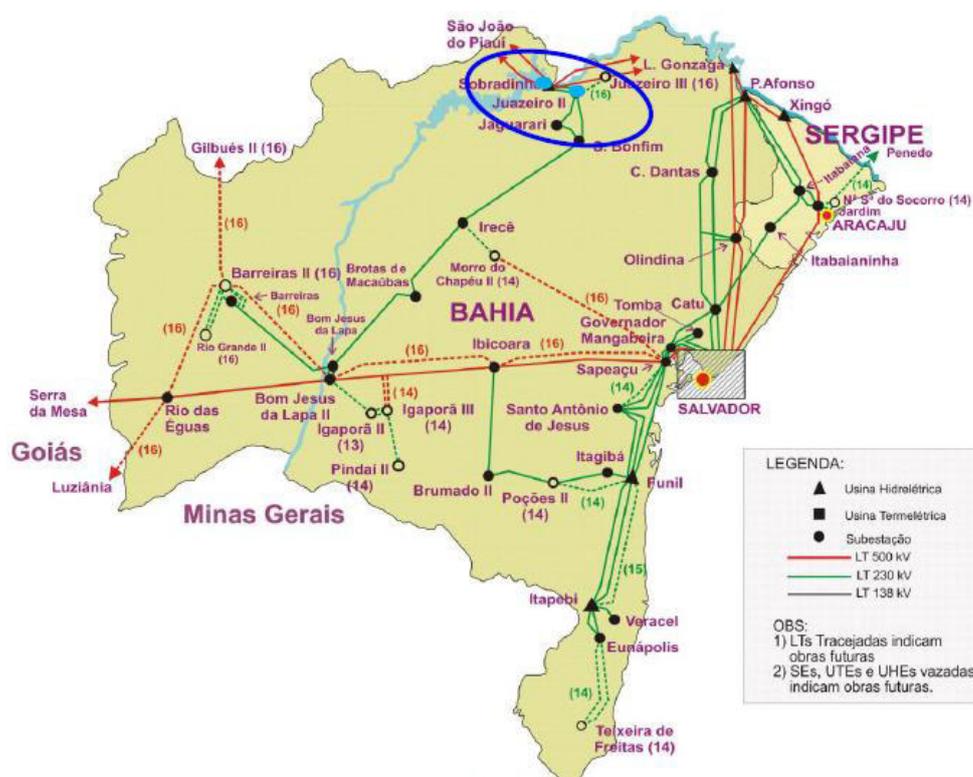


Figura 4.1 - Sistema Elétrico no Estado da Bahia (SE Juazeiro II)
Fonte: Site da Aneel.

4.2. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO ANTES DA MODERNIZAÇÃO

O sistema de proteção antes da modernização era constituído pela cadeia de relés THR, Reyrolle, sendo composta por quatro chassis, Chassi de Proteção um (CP1), Chassi de Proteção dois (CP2) e Chassi de Proteção três (CP3) e o Painel de Comando dois (PC2).

O Chassi CP1 é o responsável pela medição e contém medidor de energia conforme foto frontal do chassi CP1 presente na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Foto frontal do Chassi CP1.
Fonte: CHESF

O Chassi CP2 contém a cadeia de relés THR e alguns outros relés auxiliares. O Chassi CP2 foi substituído completamente após a modernização e, os relés presentes neste CP2 estão caracterizados no Capítulo 2. Segue, abaixo, a foto frontal na Figura 4.4



**Figura 4.4 - Foto frontal do Chassi CP2.
Fonte: CHESF**

O Chassi CP3 contém relés auxiliares e, estão caracterizados no Capítulo 2 deste trabalho. Segue a foto frontal na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Foto frontal do Chassi CP3.
Fonte: CHESF

Além dos Chassis de Proteção CP1, CP2 e CP3, o vão “E” apresenta o painel de comando PC2, que possui o multimedidor e o anunciador. Como mostra a Figura 4.6.



Figura 4.6 - Foto frontal do Chassi PC2.
Fonte: CHESF

O Painel de Comando (PC2) além de apresentar o anunciador e o multimedidor, também tem a função de alimentação de corrente contínua que vem do serviço auxiliar para todos os outros painéis.

4.3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO APÓS A MODERNIZAÇÃO

De maneira prática a modernização da proteção resulta na substituição por completo do painel CP2. Esta nova proteção - normalmente utilizada nos sistemas de proteção da CHESF - que faz parte da rede básica é do tipo proteção principal mais proteção alternada. O conceito de proteção principal e alternada é bem definido pelo ONS no submódulo 20.1, assim como também os conceitos de proteção unitária ou restrita e proteção gradativa ou irrestrita. Ou seja, segundo o ONS submódulo 20.1:

Proteção unitária ou restrita: Sistema de proteção destinado a detectar e eliminar, seletivamente e sem retardo de tempo intencional, falhas que ocorram apenas no componente protegido. São exemplos de proteção unitária ou restrita os esquemas com comunicação direta relé a relé, os esquemas de teleproteção, as proteções diferenciais, os esquemas de comparação de fase etc;

Proteção gradativa ou irrestrita: Sistema de proteção destinado a detectar e eliminar falhas que ocorram no componente protegido e fornecer proteção adicional para os componentes adjacentes. Sua atuação é normalmente coordenada com a atuação das proteções dos equipamentos adjacentes por meio de retardo de tempo intencional. São exemplos de proteção gradativa ou irrestrita as proteções de sobrecorrente e as proteções de distância;

Proteção principal: Esquema de proteção composto por um sistema de proteção unitária ou restrita e um sistema de proteção gradativa ou irrestrita;

Proteção alternada: Esquema de proteção composto por um sistema de proteção unitária ou restrita e um sistema de proteção gradativa ou

irrestrita, funcionalmente idêntico à proteção principal e completamente independente desta.

Assim, ao invés de uma cadeia de relés, o esquema é composto de uma proteção principal e proteção alternada, têm-se dois relés que executam suas funções de proteção simultaneamente e de forma independente. Com isso tem-se uma segurança a mais, graças à redundância, pois se um relé tiver defeito e não operar para uma falta, o outro deve operar em condições normais.

Na linha de transmissão em estudo são usados dois relés digitais:

- Para proteção principal: relé SEL-421;
- Proteção alternada: relé SEL-421.

A informação de corrente e tensão necessária para o funcionamento dos relés é dada através de sua entrada analógica, como mostrado na Figura 4.7, onde o relé recebe do transformador de corrente (TC) e do transformador de Potencial (TP).

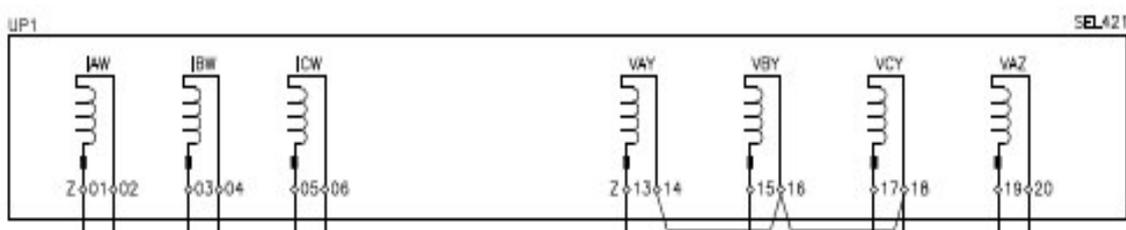


Figura 4.7 - Entrada analógica de Tensão e Corrente da proteção UP1.
Fonte: CHESF

Cada relé apresenta entradas digitais e contatos de saída dos tipos normalmente aberto (NA) e normalmente fechado (NF), no caso em questão as entradas digitais são informados estados e posição de disjuntor e seccionadoras, comando de fechamento de disjuntor, comando de religamento, recepção de carrier e abertura de minidisjuntor do TP.

Nos esquemas lógicos dos relés SEL-421, as entradas digitais são relacionadas como *inputs*. Essas informações são usadas pelo relé para processar sua lógica de proteção. Cada contato de saída é relacionado às

saídas dos diagramas lógicos de proteção (por exemplo, falha de disjuntor, bloqueio de religamento, etc.) por meio de *software* do relé, de forma que esses contatos atuam quando as respectivas saídas lógicas passam para nível lógico um. Nos diagramas lógicos internos as saídas digitais são chamadas de *outputs*.

Além dos relés digitais, o sistema de proteção da linha também dispõe de relés auxiliares. Os relés auxiliares são formados por bobinas que quando energizadas atuam seus contatos auxiliares NA ou NF. Esses relés são utilizados basicamente para aumentar o número de contatos das saídas digitais, além de serem usados em circuitos de intertravamentos e comandos. É preciso aumentar o número de contatos das saídas digitais porque quando ativadas essas saídas devem atuar em diversos circuitos, como por exemplo, circuito de abertura de disjuntor, registrador de perturbações (oscilografia), alarmes e circuito do anunciador; além de disjuntores, seccionadoras, sistema de carrier, painéis de comando entre outros.

O relé de proteção principal é chamado de unidade de proteção um (UP1) e o da proteção alternada de unidade de proteção dois (UP2). Nas entradas digitais da UP1 foram inseridas as seguintes informações:

- Estado dos disjuntores: Disjuntor do vão E (52E) (Aberto/Fechado) ou Disjuntor do vão de interligação de barras (52C) (Aberto/Fechado).
- Bloqueio de fechamento por baixa pressão: Esse dado também é conhecido como baixa pressão de SF6 de primeiro grau e é usado apenas para alarme. Ele é obtido por meio de manômetros especiais que monitoram a pressão do gás SF6 no disjuntor e energizam relés auxiliares do circuito do disjuntor de acordo com o nível de pressão interna;
- Bloqueio de função: também conhecido por baixa pressão de SF6 de segundo grau e indica um estado crítico do equipamento de forma que ele não consiga extinguir o arco elétrico corretamente. É usado nas lógicas de falha de disjuntor e bloqueio de religamento;
- Estados das seccionadoras: Seccionadoras 89-3 (Aberto/Fechado) e 89-4 (Aberto/Fechado) do vão E ou do vão C (Vão de interligação de barras) (Aberto/Fechado);

- Comando de fechamento: manual;
- Religamento ativado: é executado por meio de uma chave instalada num painel na sala de comando da SE;
- Recepção de carrier: a linha 04S1 tem dois canais para teleproteção, sendo assim tem-se recepção de carrier do canal 1 e do canal 2;
- Abertura do minidisjuntor do TP: na caixa de ligação do TP tem-se minidisjuntores com contatos NA e NF que servem para sinalizar abertura e/ou defeito.

Nas entradas digitais da UP2 foram inseridas as mesmas informações da UP1 e adicionadas às informações seguintes, conforme é mostrado Figura 4.8 e Figura 4.9.

- Partida da UP1 – Bloqueio do religamento da UP2: é usado um contato de saída da UP1 para bloquear o religamento da UP2, pois apenas uma das proteções deve ativar o religamento;
- UP1 chave em teste ou falha interna: o religamento na UP2 deve ser habilitado caso a UP1 esteja em teste ou não tenha partido o religamento por alguma falha no relé ou no caso do minidisjuntor do TP que alimenta a UP1 estiver aberto

ENTRADAS DIGITAIS - UNIDADE DE PROTEÇÃO UP1 (SEL421)

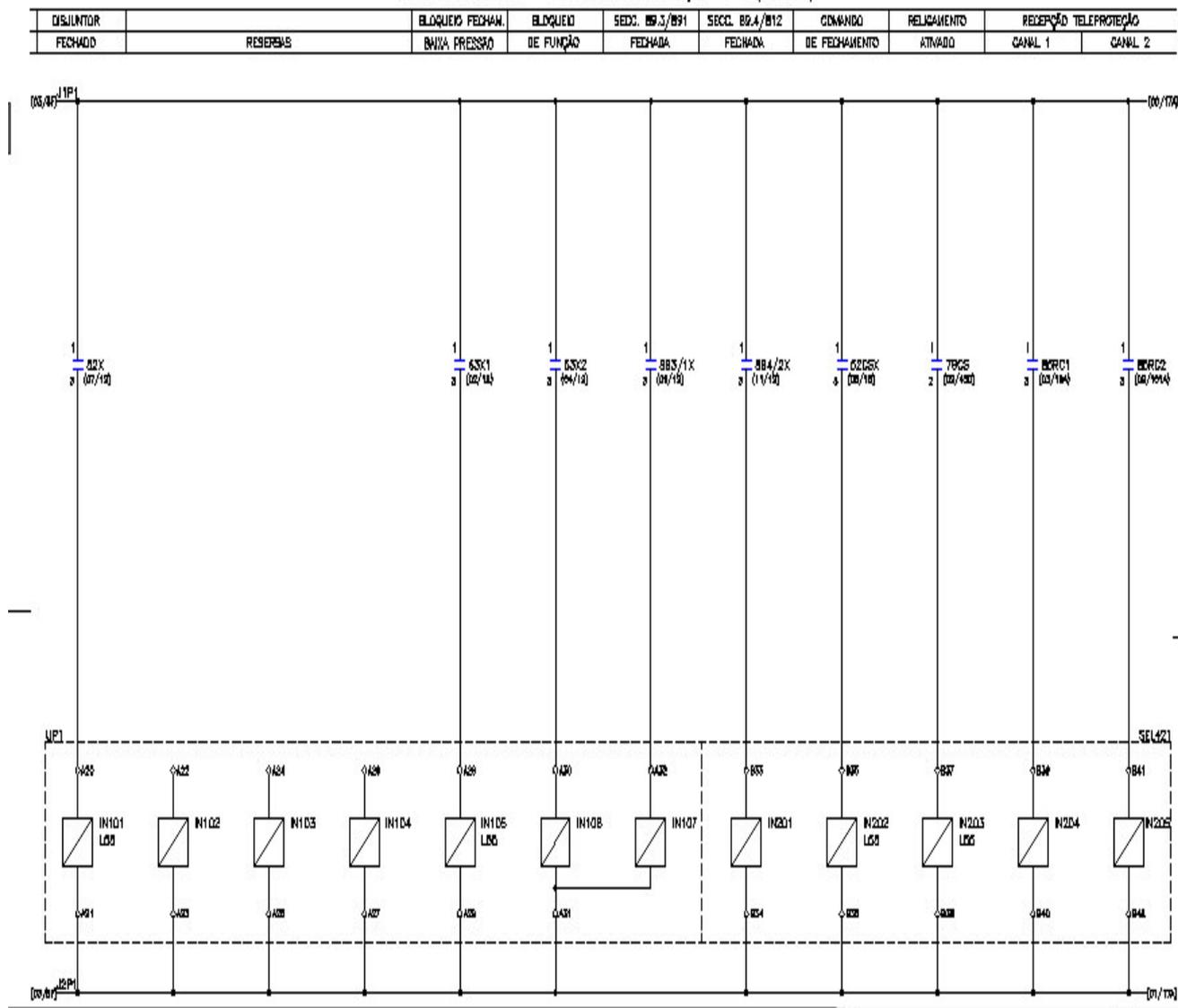


Figura 4.8 - Entradas digitais da UP1.
Fonte: CHESF

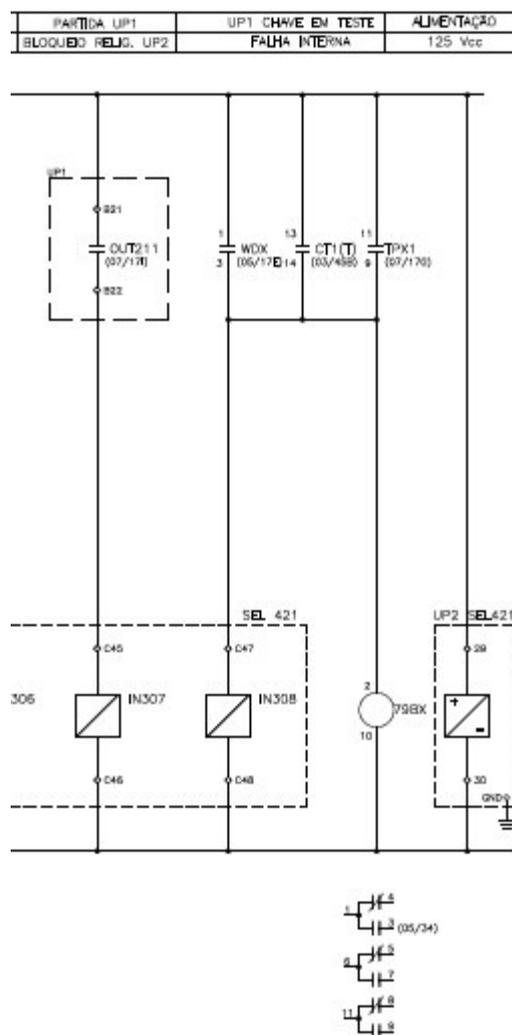


Figura 4.9 - Entradas digitais da UP2.
Fonte: CHESF

Na Figura 4.9 o relé auxiliar 79BX é utilizado para sinalização de religamento bloqueado.

O diagrama unifilar exposto na Figura 4.10, mostra como estão interligados os relés digitais com o TC e o TP e com outros equipamentos envolvidos no sistema de proteção. Nos blocos da proteção principal e alternada estão representadas as diversas funções de proteção que cada relé digital contempla: distância (21), sobrecorrente direcional (67), sobrecorrente instantânea e temporizada (50/51), falha de disjuntor (50BF), sincronismo (25), bloqueio por oscilação de potência (68), religamento (79). Desta maneira pode-

se observar que ocorre significativa diminuição dos relés, sendo as saídas digitais das proteções fazendo o papel de outros relés.

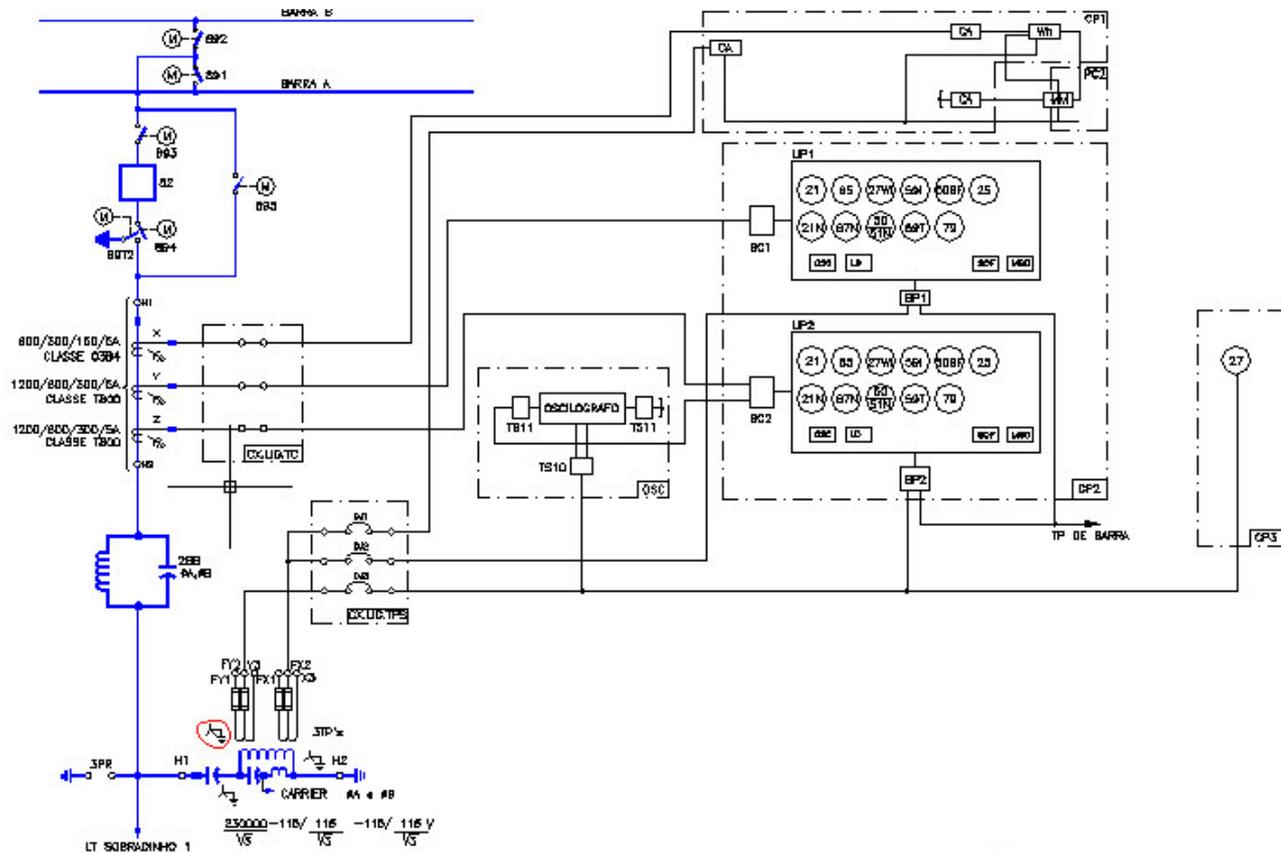
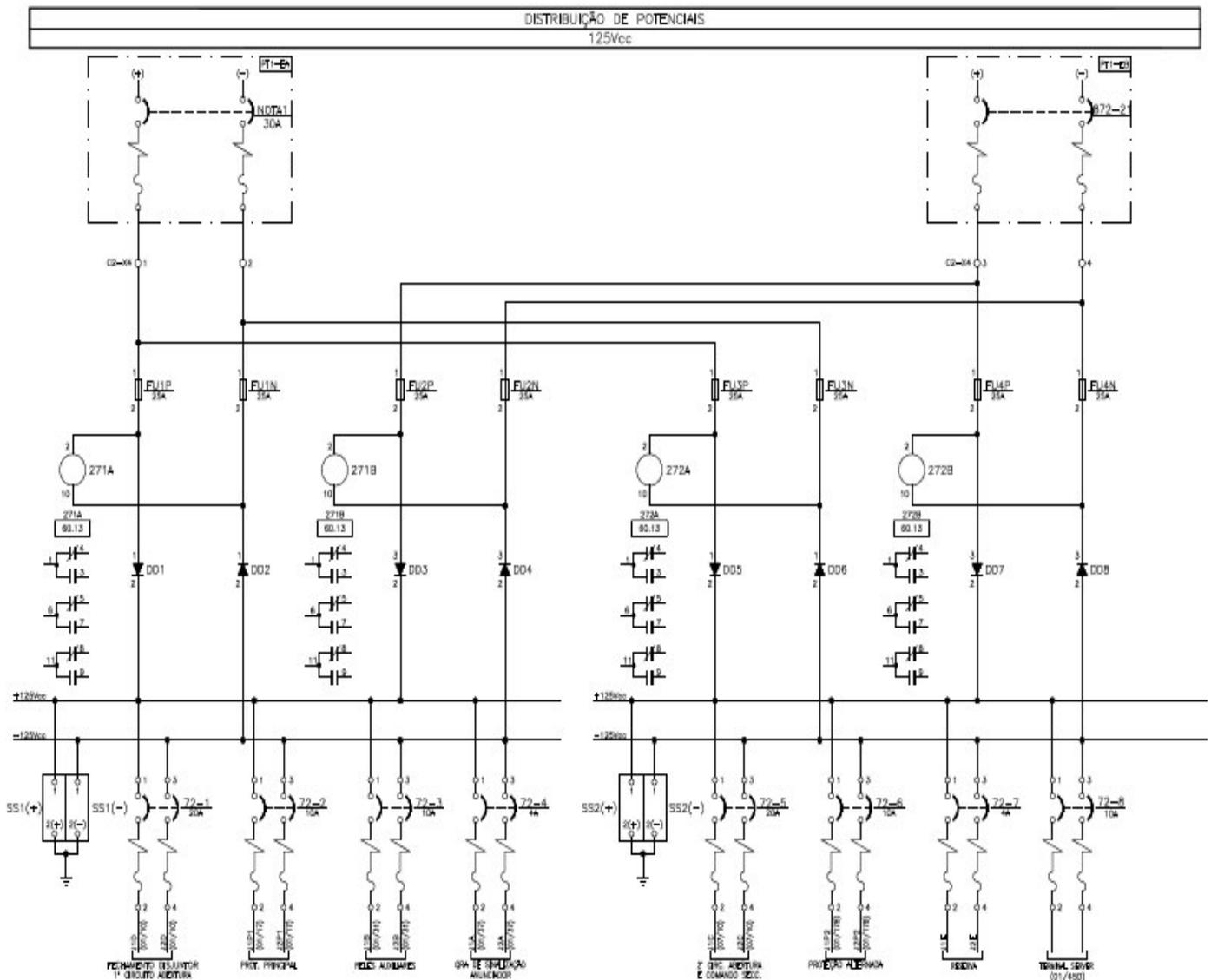


Figura 4.10 - Diagrama Unifilar
Fonte: CHESF

A proteção principal, proteção alternada, os circuito de fechamento do disjuntor são alimentados por corrente contínua. E essa alimentação também será feita pelo novo painel CP2 que será instalado durante a modernização como mostrado na Figura 4.11. Antes a alimentação da corrente contínua (CC) era feita no pelo painel de comando o PC2.



Outra grande mudança de funcionalidade foi deixar predisposta a lógica de falha de disjuntor que consiste que em caso de defeito no disjuntor resultando em uma não abertura completa do mesmo quando solicitado, outros disjuntores de retaguarda (local e/ou remota) deverão ser abertos automaticamente para isolar o disjuntor defeituoso.

Segue na Figura 4.12 a lógica de falha digital implementada pelo relé SEL-421.

A ativação do esquema de falha de disjuntor depende, antes de tudo, da posição das seccionadoras só poderá ocorrer atuação do falha, se as duas seccionadoras estiverem fechadas.

Outro fator determinante para atuação da lógica de falha é a baixa pressão de SF6 no disjuntor. De forma que, caso haja algum trip (comando de fechamento) por alguma função interna do relé e o mesmo esteja recebendo sinal de baixa pressão de SF6 2º grau e, ainda, qualquer um dos pólos do equipamento esteja fechado, ocorrerá atuação da saída binária correspondente ao falha de disjuntor. Ou seja, a baixa pressão de SF6 de segundo grau desconsidera a temporização da falha.

O contato de sinalização de falha de disjuntor utilizado pelo relé permanecerá fechado (setado) até que ocorra a abertura de pelo menos uma das chaves que isolam o disjuntor. Isto é, a abertura das chaves seccionadoras 89.3 ou 89.4 efetua o reset da falha.

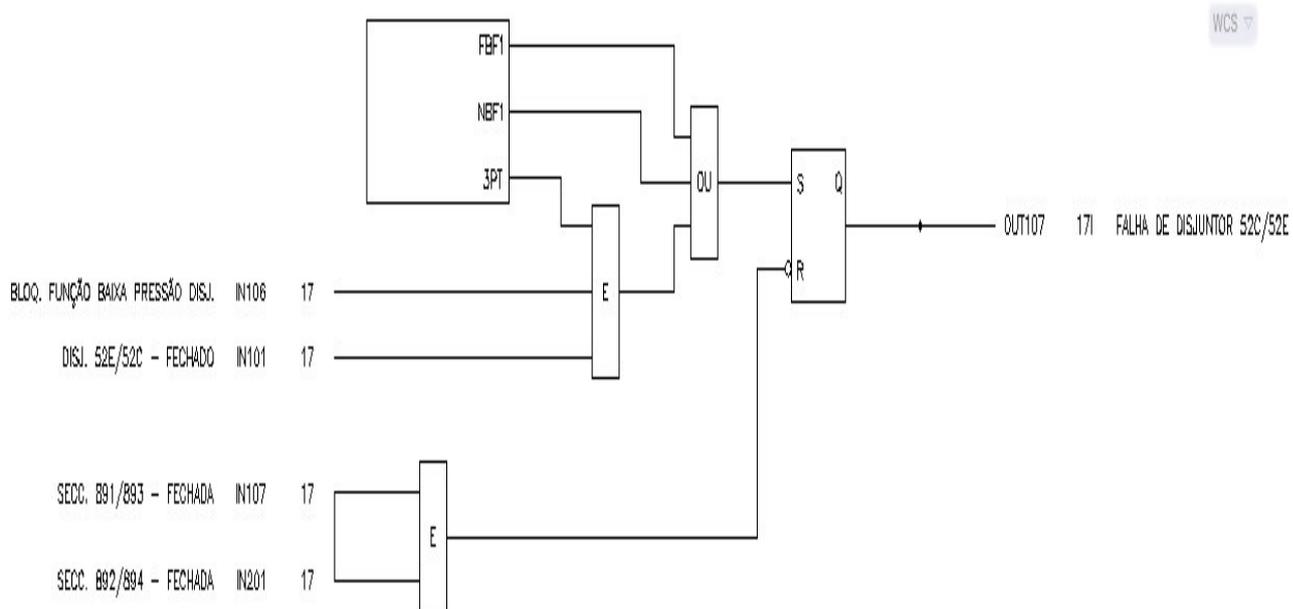


Figura 4.12 – Lógica de Falha de disjuntor
Fonte: CHESF

4.4. TESTE DE FUNCIONALIDADE DA PROTEÇÃO APÓS A MODERNIZAÇÃO

Uma maneira de testar a funcionalidade da nova proteção é a simulação de faltas e verificando o tempo de resposta da proteção.

Para o teste foi usado uma caixa de teste da Omicron, como a da Figura 4.13.



Figura 4.13 – Caixa de Teste Omicron
Fonte: Manual Omicron

O teste completo para verificação da funcionalidade da nova proteção é composto de vários tipos de faltas. Nesse trabalho será mostrado o resultado apenas da falha que acarreta um *Trip* (abertura do disjuntor), quando o relé enxergar uma falha na sua primeira zona da proteção de distancia. Como mostra abaixo os dados da falha:

- A falha aplicada foi uma falha A-N;
- Com um valor de $Z_{Falha(polar)}$ de $1,839 ;80,31)^\circ \Omega$;
- Com uma corrente de teste de 3 A;

Segue o ajuste injetado no relé através da caixa de teste:

Tabela 4.1- Ajuste do Gerador aplicado à nova proteção

V A-N	5,517V	0,00°
V B-N	66,395V	-120,00°
V C-N	66,395V	120,00°
I A	3,000A	-80,31°
I B	0,000A	0,00°
I C	0,000A	0,00°

De maneira a melhor visualizar segue o diagrama Fasorial das tensões e correntes na Figura 4.14.

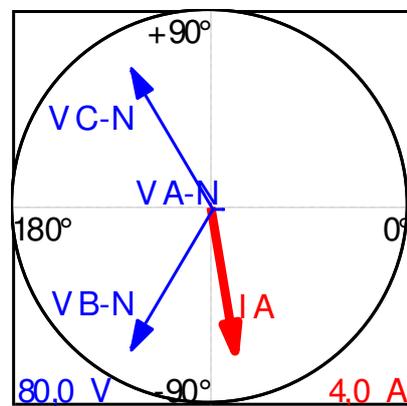


Figura 4.14 – Diagrama Fasorial

Como esperado uma falta na primeira zona de um relé de distância apresenta uma resposta instantânea. O Relé SEL 421 apresentou uma resposta de 0,022s.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste documento foi apresentado um caso prático da substituição do relé eletromecânico pelo digital.

Ficou evidenciado que a utilização de relés digitais minimiza o espaço usado nas cabanas de relés, pois devido ao uso das lógicas internas cada relé executa diversas funções de proteção o que antes era feito por equipamentos distintos. Além disso, tem-se um ganho na facilidade de ajuste dos mesmos, na coordenação, seletividade e velocidade.

A principal contribuição desse trabalho foi o desenvolvimento de uma documentação que trata de um assunto importante e que ainda não tem muita referências na literatura, podendo este servir para uma introdução ao tema por iniciantes na área de proteção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CAMINHA, Amadeu Casal. **Introdução a proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo: 1977, 211p.

[2] Kindermann, Geraldo. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Florianópolis: 1999, 231p.

[3] Reyrolle Protection. **Operating Recommendations THR distance protection**: 1985, 42p.

[4] Coury, D. V.; Oleskolcz, M.; Giovanni, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência**. São Carlos: 2007.

[5] Schweitzer Engineering Laboratories. Instruction Manual: **Protection and Automation System SEL-421**. 2011.