



Federação das Indústrias do Estado da Bahia

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Engenharia Elétrica

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE BANCADA GTD E RELÉS

Salvador

2020

Antonio Vitor da Cruz Villas Bôas

Diego Mota Santana

Jefferson Salas de Lima

Matheus de Faria Dantas

Victor Gabriel da Costa Casanas

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE BANCADA GTD E RELÉS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiros Eletricistas.

Orientador: Frederico Ramos Cesário

Salvador

2020

TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE BANCADA GTD E RELÉS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiros Eletricistas.

Banca Examinadora:

Frederico Ramos Cesário – Orientador

João Lucas da Hora – Docente TheoPrax

Sergio Oliveira Pitombo – Coordenador

Aprovado em: _____ de _____ 2020

Salvador
2020

AGRADECIMENTOS

A equipe agradece a Deus pela saúde, força e ressignação para superar as dificuldades.

Ao SENAI CIMATEC pela oportunidade de trabalhar neste projeto que traz um horizonte maior sobre nossa formação. Nos dando mais experiência, conhecimento e confiança para exercer a profissão.

Ao nosso orientador Frederico Ramos Cesário pelo apoio, tempo que lhe coube e correções para um melhor trabalho.

Aos nossos pais, pelo amor, incentivo e apoio moral que foram imprescindíveis.

E a todos familiares e amigos que de forma direta ou indireta fizeram parte das nossas formações e conquistas, deixamos aqui o nosso muito obrigado.

RESUMO

Neste trabalho são demonstradas simulações de linhas de transmissão por meio de bancada didática e parametrização de algumas funções de proteção do relé digital SEL 421. O trabalho tem como objetivo a integração da bancada didática Soma, de geração, transmissão e distribuição de energia com relé digital SEL 421 para o desenvolvimento de roteiros de práticas do tipo professor/aluno.

Inicialmente foi realizado um estudo da bancada para entender como as linhas de transmissão eram simuladas e de todos os módulos para determinar as proteções que poderiam ser realizadas com a bancada. Com esses dados foi realizado o estudo do relé. Foram confrontados os dados da bancada e do equipamento de proteção afim de verificar os pontos em comum e assim determinar as proteções possíveis.

Determinados as funções se deu início ao processo parametrização de relé e simulação dos problemas para que verificar a atuação do relé e captar os dados.

Ao final das simulações foram desenvolvidos os roteiros para prática de sincronismo, sobrecorrente instantânea, sobrecorrente temporizada, falta de fase além de algumas observações referentes aos módulos da bancada.

Palavras-chave: Energia; Bancada; Relé; Módulos; Sistema.

ABSTRACT

In this work, simulations of transmission lines are demonstrated by means of a didactic bench and the parameterization of some protection functions of the SEL 421 digital relay. The work aims to integrate the Soma didactic bench, of generation, transmission and distribution of energy with SEL 421 digital relay for the development of teacher / student practices.

Initially, a study of the bench was carried out to understand how the transmission lines were simulated and of all modules to determine the protections that could be carried out with the bench. With these data, the study of the relay was carried out. The bench and protective equipment data were compared in order to verify the common points and thus determine the possible protections.

Once the functions were determined, the relay parameterization process and problem simulation were initiated so that the performance of the relay can be verified and the data captured.

At the end of the simulations, scripts were developed for the practice of Synchronism, Instantaneous Overcurrent, Timed Overcurrent, Lack of phase in addition to some observations regarding the bench modules.

Keywords: Energy; Bench; Relay; Modules; System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.	14
Figura 2 - Curva Relé Instantâneo	16
Figura 3 - - Curva Relé Temporizado	17
Figura 4 - Modelo Linha De Transmissão Curta	20
Figura 5 - Linha De Transmissão Média Modelo π	21
Figura 6 - Diagrama Simplificado Da Linha De Transmissão Longa	22
Figura 7 - Estrutura da Bancada.....	24
Figura 8 - Módulos de Linhas de Transmissão (GTD -07).....	25
Figura 9 - Analisador de Energia (GTD- 05).....	26
Figura 10 - Módulos de Carga Indutiva (GTD-11 e GTD-12)	27
Figura 11 - Módulos de Carga Resistiva (GTD-13 e GTD -14).....	28
Figura 12 - Módulos de Carga Capacitiva (GTD-10 e GTD-09).....	29
Figura 13 - Módulo de Proteção e Seccionamento (GTD-01).....	30
Figura 14 - Módulo Inversor de Frequência (GTD -02).....	31
Figura 15 - Módulo do Relé Falta de Fase (GTD-06)	32
Figura 16 - Módulo Moto-Gerador (GTD-03).....	33
Figura 17 - Módulo medidor de tensão de gerador (GTD-15).....	34
Figura 18 - Módulo DJ e IDR(GTD-04).....	35
Figura 19 - Módulo de Contatores (GTD-19).....	35
Figura 20 - Instalação Do Circuito Base Utilizados Em Todos Os Experimentos	37
Figura 21 - Instalação Para Análise Das Grandezas Das Linhas De Transmissão	37
Figura 22 - Módulo de Linhas de Transmissão curta	40
Figura 23 - Conexão Completa em 220V fase-fase para Prática Balanceamento de Carga	41

Figura 24 - Tela Inicial do AcSELErator QuickSet	44
Figura 25 - Tela de Seleção do Relé.	44
Figura 26 - Formulário “Part Number”.....	45
Figura 27 - Formulário “General Global Settings”	45
Figura 28 - Figura 28 - Formulário “Line Configuration”	46
Figura 29 - Relay Configuration	47
Figura 30 - Instalação do Relé SEL 421 na Bancada GTD	47
Figura 31 - Instalação do Relé SEL 421 na Bancada GTD	48
Figura 32 - Synchronism Check	49
Figura 33 - Main Board.....	51
Figura 34 - Envio das Configurações para o Relé	51
Figura 35 - Detecção Da Atuação Da Função 25 No SEL 421 Na Bancada GTD.....	52
Figura 36 - Phase Inst O/C.....	53
Figura 37 - Main Board.....	54
Figura 38 - Envio das Configurações para o Relé	54
Figura 39 - Detecção Da Atuação Da Função 50 No SEL 421 Na Bancada GTD.....	55
Figura 40 - Configurações Sobrecorrente Temporizada.....	56
Figura 41 - Configuração Saida Sobrecorrente Temporizada	57
Figura 42 - Envio das Configurações para o Relé	58
Figura 43 - Detecção Da Atuação Da Função 51 No SEL 421 Na Bancada GTD.....	59
Figura 44 - Configuração Função Pole Open Detection.....	59
Figura 45 - Configuração De Saída Para Falta De Fase	60
Figura 46 - Envio das Configurações para o Relé	61
Figura 47 - Detecção da atuação da função SPOA no SEL 421 na bancada GTD.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensões Nominais de PowerNet T-50	26
Tabela 2 - Limites Tensão e Corrente das Cargas Resistivas	28
Tabela 3 - Tensões De Alimentação Do Módulo Moto-Gerador	33
Tabela 4 - Tensões e Correntes Nominais para PowerNet M-200.....	34
Tabela 5 - Medição Das Grandezas Elétricas Da Linha De Transmissão Média	38
Tabela 6 - Medição Das Grandezas Elétricas Da Linha De Transmissão Longa	38
Tabela 7 - Fator De Potência Teórico E Experimental	42
Tabela 8 - Fator De Potência Teórico E Experimental Com Banco De Resistores	42
Tabela 9 - Checklist Função Sincronismo	50
Tabela 10 - Checklist da função de sobrecorrente temporizada	57
Tabela 11 - Checklist Da Função Falta De Fase.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>Standard Device Numbers & Common Acronyms</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DJ	Disjuntor Termomagnético
GTD	Geração, Transmissão e Distribuição de Energia elétrica
IDR	Interruptor Diferencial Residual
LT	Linha de Transmissão
MDF	Medium Density Fiberboard
RMS	Root Mean Square
SEP	Sistemas Especiais de Proteção
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
THD	Total Harmonic Distortionion

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	12
1.2	PROBLEMA	13
1.3	JUSTIFICATIVA.....	13
1.4	OBJETIVO GERAL.....	13
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	SISTEMA DE PROTEÇÃO	15
2.2	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	15
2.2.1	Relés De Proteção	16
2.2.1.1	Proteção Contra Sobrecorrentes (50/50n E 51/51n).....	16
2.2.1.2	Proteção Contra Subtensão (27).....	17
2.2.1.3	Proteção Contra Sobretensão (59).....	17
2.2.1.4	Relé De Proteção Diferencial (87).....	18
2.2.1.5	Relé De Sobrecorrente Direcional (67).....	18
2.2.1.6	Relé De Sincronismo (25).....	19
2.2.1.7	Relé De Distância (21).....	19
2.3	MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	20
2.3.1	Linha De Transmissão.....	20
2.3.2	Linha De Transmissão Curta.....	20
2.3.3	Linha De Transmissão Média	21
2.3.4	Linha De Transmissão Longa.....	22
3.	BANCADA GTD	23
3.1	DESCRIÇÃO.....	23

3.2	ESTRUTURA DA BANCADA	23
3.3	MÓDULOS	24
3.3.1	Módulo De Linhas De Transmissão	24
3.3.2	Módulos Analisadores De Energia.....	25
3.3.3	Módulos De Carga Indutiva.....	27
3.3.4	Módulos De Carga Resistiva.....	27
3.3.5	Módulos De Carga Capacitiva	28
3.3.6	Módulo De Proteção E Seccionamento	29
3.3.7	Módulo Inversor De Frequência	30
3.3.8	Módulo Do Relé Falta De Fase	31
3.3.9	Módulo Moto-Gerador	32
3.3.10	Módulo Medidor De Tensão Do Gerador	33
3.3.11	Módulo de Proteção DJ e IDR	34
3.3.12	Módulo De Contatores.....	35
4.	EXPERIMENTO.....	36
4.1	PRÁTICA PARA ANÁLISE DE PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO POR ANALISADORES DE ENERGIA.....	36
4.2	DESENVOLVIMENTO DO MODULO DE LINHA DE TRANSMISSÃO CURTA	39
4.3	PRÁTICA BALANCEAMENTO DE CARGA	40
4.4	PARAMETRIZAÇÃO E ENSAIOS DO RELÉ SEL 421.....	42
4.4.1	Relé De Proteção Sel 421	42
4.4.2	Parametrização Do Relé	43
4.4.3	Função 25 Sincronismo	48
4.4.4	Função 50 Sobrecorrente Instantâneo.....	52
4.4.5	Função 51 Sobrecorrente Temporizada	55

4.4.6	Função Falta De Fase.....	59
5.	Recomendações para trabalhos futuros.....	63
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica é um elemento fundamental na sociedade atual. Para termos controle dos três componentes básicos da energia, foi criado o Sistema Elétrico de Potência (SEP).

A finalidade do SEP é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica de acordo com as normas, padrões de confiabilidade, qualidade, disponibilidade segurança e custos, tendo em vista o menor impacto ambiental e o máximo de segurança pessoal.

A **geração** (G) de energia vem da transformação de outras energias da física em energia elétrica. Podemos extraí-la de fontes não renováveis (petróleo, carvão e gás natural), ou das renováveis (hidráulica – predominante no Brasil –, eólica, solar, maremotriz etc.).

A **transmissão** (T) elétrica tem por função transportar energia de um centro de consumo a outro de modo a evitar ao máximo as perdas nas linhas de transmissão (LT), usando corrente contínua ou alternada (como maior parte dos casos).

Já a **distribuição** (D) de energia é uma ramificação da transmissão, há a conversão de alta/media tensão vinda das subestações (centros de consumo) para baixa tensão, onde chegará às residências e indústrias do local. Na década de 1990, houve a privatização deste setor.

O sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica brasileiro tem uma matriz energética bastante diversificada (maioria composta por fontes renováveis) e propagada em todo o país que possui proporções continentais. Estudar esse sistema GTD é fundamental para a engenharia elétrica. Para isso, existe a metodologia prática com bancadas GTD's que simulam através de módulos – a serem melhor explorados em todo o item 3 – as tensões geradas por turbinas, perdas por impedância nas linhas de transmissão (LT) e distribuição em redes de tensão baixa.

Em todo SEP, deve existir sistemas de proteção para que seja possível isolar falhas nesse sistema e proteger os demais equipamentos. Logo, no estudo de GTD se faz também necessário o estudo desses equipamentos (disjuntores, relés, fusíveis etc.) para que a experiência da prática seja a mais próxima o possível para o estudante.

1.2 PROBLEMA

A necessidade do desenvolvimento de roteiros para práticas do tipo professor aluno a serem aplicadas nas matérias de proteção de sistemas elétricos e Transmissão, Geração e Distribuição de energia elétrica do curso de graduação em engenharia elétrica do Centro Universitário SENAI CIMATEC.

1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente no SENAI CIMATEC há uma dificuldade para integração da bancada de GTD com o rack de relés de proteção. Sendo assim, a ausência de práticas após a aquisição da nova bancada priva os alunos da possibilidade de aprender na prática o entendimento sobre o sistema elétrico e suas etapas.

Neste artigo, buscamos trazer a teoria que fundamentou a elaboração dos roteiros das práticas para que seja o mais próximo possível do sistema real, bem como explanar seus métodos de proteção. Garantindo assim, uma experiência mais completa para os alunos.

1.4 OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicabilidade da bancada GTD e relés digitais a fim de desenvolver roteiros de práticas em um período de seis meses.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

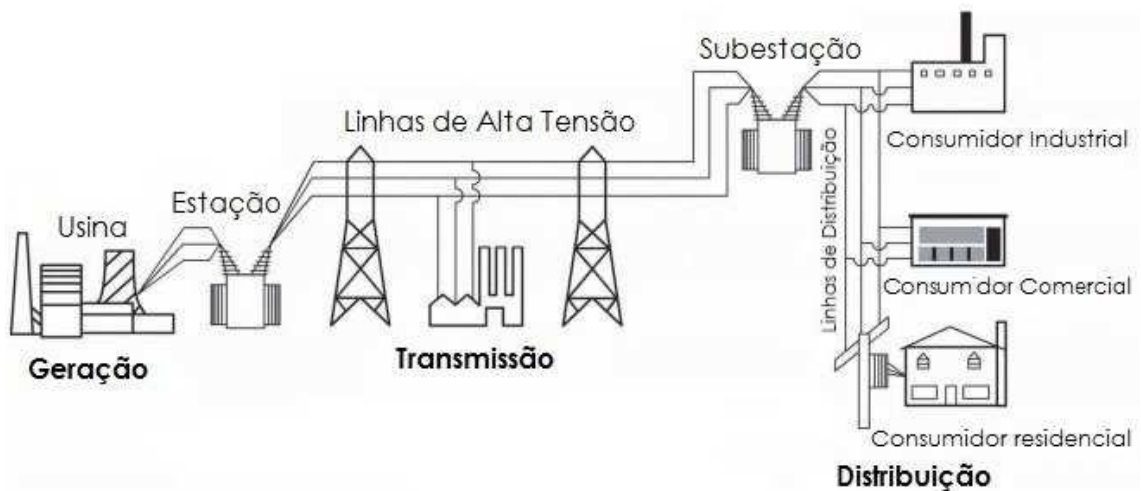
- Estudar as configurações dos relés de proteção digitais Siemens e SEL.
- Organizar a bancada didática de forma intuitiva e prática.
- Analisar integração da bancada didática de geração, transmissão e distribuição.
- Realizar ensaios dos equipamentos da bancada.
- Elaborar roteiros que simulem um sistema elétrico de potência.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A finalidade do sistema elétrico de potência (SEP) é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica de acordo com as normas, padrões de confiabilidade, qualidade, disponibilidade segurança e custos, tendo em vista o menor impacto ambiental e o máximo de segurança pessoal.

Segundo STEVENSON, o sistema de energia elétrica é fundamentado em usinas de geração, em que as tensões dos geradores estão na faixa de 13,8 kV a 24 kV e os grandes e modernos geradores são construídos para tensões de 18 a 24 kV, no qual são elevadas para que transmitam energia através de sistemas de transmissão de alta tensão de níveis de 115 a 765 kV. Logo na unidade de subestação abaixadora onde ocorre a redução de tensão para assim ser distribuída para os consumidores industriais, comerciais e residenciais como ilustrado na figura 1.

Figura 1 - Sistema de Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-3-VISAO-GERAL-DE-UM-SISTEMA-DE-GERACAO-TRANSMISSAO-E-DISTRIBUICAO-DE-ENERGIA_fig1_262373193

2.1 SISTEMA DE PROTEÇÃO

Na operação dos sistemas elétricos de potência surgem, com certa frequência, falhas nos seus componentes que resultam em interrupções no fornecimento de energia aos consumidores conectados a esses sistemas, com a consequente redução da qualidade do serviço prestado.

As principais falhas do sistema elétrico são curtos-circuitos e sobrecargas. Curtos-circuitos podem ser causados de várias maneiras, incluindo falha no isolamento devido ao calor ou umidade excessiva, danos mecânicos ao equipamento de distribuição elétrica e ou outro abuso.

Apesar de todas as preocupações e cuidados para evitar a ocorrência de curtos-circuitos, sobrecargas e as sub e sobretensões, elas estão presente no dia a dia do funcionamento dos sistemas elétricos de potência, mesmo seguindo as todas as normas. Por isso se vê a necessidade de um sistema de proteção para assegurar a desconexão de todo sistema elétrico submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos. (Mamede, 2011).

O objetivo da proteção do sistema de energia é isolar uma seção defeituosa do sistema do restante do sistema ativo, para que a parte restante possa funcionar satisfatoriamente sem nenhum dano grave devido à corrente de falha. Na ocorrência de uma falha, o disjuntor isola o sistema defeituoso do restante do sistema e esses disjuntores são abertos automaticamente durante a condição de falha devido ao seu sinal de disparo que vem do relé de proteção. A principal filosofia sobre proteção é que nenhuma proteção do sistema de energia pode impedir o fluxo de corrente de falta do sistema, ele apenas pode impedir a continuação do fluxo desconectando rapidamente o caminho do curto-circuito do sistema. (Mamede, 2011).

2.2 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Existem dois dispositivos básicos empregados na proteção de sistemas elétricos de qualquer natureza: os fusíveis e os relés. O fusível é um elemento base para proteção contra curto-circuito. Ele é projetado como dispositivo térmico com elemento de baixo ponto de fusão envolvido em caixa de vidro ou cerâmica. Para efeito de segurança, dimensiona o elemento do fusível para possuir uma capacidade de carga de corrente muito menor e, em caso de curto-circuito, o elo fusível aquece devido à sobrecorrente e o mesmo funde-se, interrompendo a

passagem de corrente elétrica, evitando assim danos à instalação e aos equipamentos. (Andrade, 2017). Já os relés de proteção detectam condições anormais, como falhas nos circuitos elétricos, e operam automaticamente para isolar o equipamento defeituoso do sistema o mais rápido possível. Por ser um dispositivo inteligente consegue oferecer proteção aos sistemas elétricos nas mais diversas formas: sobrecarga, curto-circuito, sobretensão, subtensão etc. (Mamede, 2011).

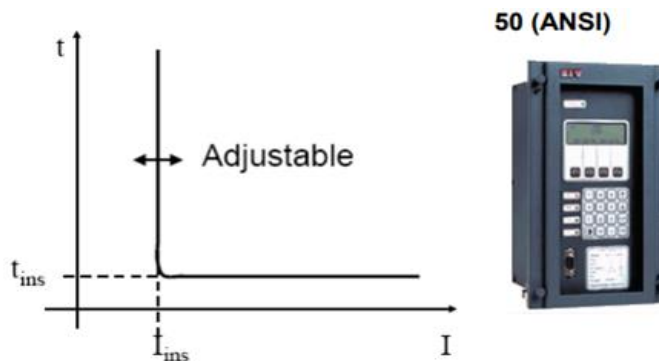
2.2.1 Relés De Proteção

2.2.1.1 Proteção Contra Sobrecorrentes (50/50n E 51/51n)

O relé de sobrecorrente é o tipo de proteção mais simples e barato, usado para proteção de linhas, transformadores, geradores e motores. Os mais comumente utilizados são os relés de sobrecorrente instantâneos (50) e os temporizadores (51). Eles são usados como dispositivos de proteção primária e de backup e são aplicados em cada zona de proteção do sistema. Se o relé está ligado para proteção de fase, as suas unidades são conhecidas como 50 e 51 de fases (50/51). No caso de estar realizando a proteção de neutro ou terra, fala-se em unidades 50 e 51 de neutro ou terra (50N/51N) (ALMEIDA, 2000 apud TIZO, 2013).

Os relés instantâneos (50) como o nome já especificam são dispositivos com um tempo de latência muito baixo como mostrado na figura 2.

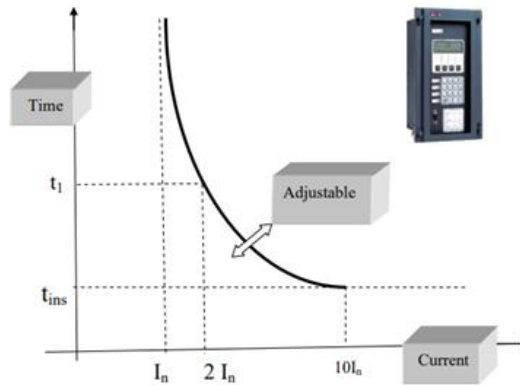
Figura 2 - Curva Relé Instantâneo



Fonte: encurtador.com.br/gmrLM

Já os temporizadores (51) esse tipo de relé possui um tempo de operação que dependendo do valor da corrente, geralmente com uma característica inversa; o tempo de operação do relé é menor à medida que a corrente aumenta como visto na figura 3 abaixo.

Figura 3 - - Curva Relé Temporizado



Fonte: encurtador.com.br/gmrLM

2.2.1.2 Proteção Contra Subtensão (27)

As subtensões ocorrem devido a vários motivos, como falhas no sistema; aumento da quantidade de carga, perda de um transformador de entrada etc. A configuração de subtensão é geralmente 80% da tensão operacional normal. Se a tensão cair abaixo deste nível durante o período definido, o comando de disparo emitido pelo relé e, portanto, o sistema é isolado.

Geralmente, os motores param abaixo de 80% da tensão nominal. Um elemento de subtensão pode ser configurado para disparar os circuitos do motor uma vez abaixo de 80%, para que, na restauração da alimentação, uma sobrecarga não seja causada pela partida simultânea de todos os motores.

2.2.1.3 Proteção Contra Sobretensão (59)

A sobretensão do sistema pode danificar o isolamento dos componentes. As sobretensões ocorrem devido à perda repentina de carga, funcionamento inadequado do comutador, mau funcionamento do gerador AVR e mau funcionamento dos componentes reativos etc.

A configuração Sobretensão geralmente é 110 a 130% da tensão operacional normal, dependendo dos requisitos do sistema. Se a tensão subir acima deste nível durante o período definido, o comando de disparo emitido pelo relé e, portanto, o sistema é isolado. A configuração de tempo é usada para evitar disparos devido a distúrbios transitórios.

2.2.1.4 Relé De Proteção Diferencial (87)

O relé diferencial é o mais importante e amplamente utilizado para a proteção de transformadores, unidade geradora-transformadora, barramentos, alimentadores e motores pesados etc. no sistema de energia elétrica, o código ANSI do relé diferencial é 87. Pode receber uma letra adicional como 87T (diferencial de transformador), 87B (diferencial de barra), 87G (diferencial de gerador), 87M (diferencial de motor). O relé diferencial como o nome remete é um relé de uma única grandeza ligado em um arranjo diferencial a dois transformadores de corrente comparando os valores medidos considerando a amplitude e fase do sinal. (Mardegan, 2010).

2.2.1.5 Relé De Sobrecorrente Direcional (67)

O relé de sobrecorrente direcional (67) refere-se ao relé que pode usar a relação de fase de tensão e corrente para determinar a direção de uma falha. A proteção direcional geralmente é encontrada em associação com outras proteções, como proteção de sobrecorrente, de distância e diferencial com o objetivo de auxiliar o diagnóstico de distúrbios nas linhas de transmissão, barramentos, transformadores e geradores. Os relés direcionais de sobrecorrente (67) respondem ao fluxo excessivo de corrente em uma direção específica em um sistema de potência. O funcionamento dessa proteção se dar por um elemento direcional, que determina a direção do fluxo de corrente em relação a uma referência de tensão. Quando esse fluxo de corrente está na direção predeterminada de disparo, esse elemento direcional habilita o outro elemento, que é um relé de sobrecorrente padrão. (BRIDGER, 1991).

2.2.1.6 Relé De Sincronismo (25)

O relé de sincronismo ou de verificação sincronizada é usado para verificar o sincronismo de dois alternadores. Um relé de sincronismo determina eletricamente se a diferença na magnitude da tensão, na frequência e no ângulo da fase cai dentro dos limites permitidos. Esses relés geralmente são usados quando há necessidade de conectar dois ou mais sistemas a uma única linha. Os limites permitidos variam de acordo com a localização no sistema de potência. Normalmente, quanto mais longe a geração e a carga, mais diferenças de ângulo de fase podem ser toleradas. Os relés de sincronismo normalmente não fornecem indicação da magnitude da tensão, frequência ou ângulo de fase.

Quando dois sistemas devem ser interconectados, os seguintes parâmetros devem ser considerados: a tensão dos dois geradores deve ser igual (para um gerador único a tensão do gerador deve ser igual à tensão da rede); a frequência e a fase também devem ser as mesmas. Quando estes requisitos não coincidem, as falhas não apenas danificam a linha, mas também os geradores e transformadores no sistema.

2.2.1.7 Relé De Distância (21)

Os relés de distância (21) são amplamente utilizados para proteção de linhas de transmissão. Através de sinais de tensão e de corrente provenientes dos TPs e TCs, respectivamente, esses relés estimam a impedância desde a sua posição até o ponto em falta. O princípio do relé de proteção de distância difere de outras formas de proteção porque seu desempenho não depende da magnitude da corrente ou da tensão no circuito de proteção, mas depende da proporção dessas duas grandezas. Apenas quando a razão de tensão e corrente cai abaixo de um valor definido que ele começa a atuar. Durante uma falha, a magnitude da corrente aumenta e a tensão no ponto de falha diminui. A proporção da corrente e da tensão é medida em relação ao TC e TP. A tensão em relação ao TP depende de qual é a distância entre o TP e a falha. Se a falha estiver mais próxima, a tensão medida será menor e, se a falha estiver mais longe, a tensão medida será maior. (CRUZ, 2013).

2.3 MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

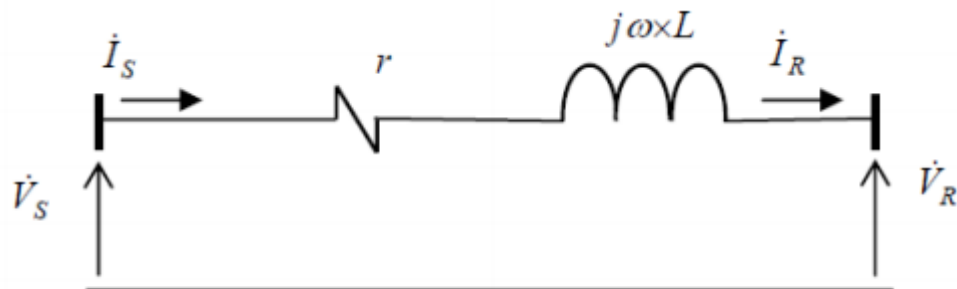
2.3.1 Linha De Transmissão

É um sistema que em sua plenitude transmite energia, no qual, saindo dos geradores, a eletricidade começa a ser transportada através de cabos aéreos, revestidos por camadas isolantes e fixados em grandes torres de metal, ou seja, à transmissão não é irradiada, mas, sim guiada de uma fonte geração para uma carga consumidora, ao conjunto de cabos e torres dá-se o nome de rede de transmissão. Podemos classificar as linhas de transmissão como linhas curtas médias e longas cada classificação possui grandezas e parâmetros específicos.

2.3.2 Linha De Transmissão Curta

Normalmente essas linhas são de até 80 Km, tendo a capacitância de linha desprezada a essa distância, já que é a esse comprimento seu efeito é tão pequeno, bem como a condutância de linha. Logo a linha nessa distância sofre efeito de seus parâmetros de resistência e indutância em série como mostrado na figura 4.

Figura 4 - Modelo Linha De Transmissão Curta



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

Como não existem ramos de derivação logo a corrente é a mesma nas duas extremidades da linha, ou seja, a corrente da transmissora é igual à da receptora.

$$\dot{I}_S = \dot{I}_R$$

A tensão na barra transmissora é dada por:

$$\dot{V}_S = \dot{V}_R + Z \cdot \dot{I}_R$$

A impedância complexa série:

$$Z = r + j \cdot X_L$$

Temos que:

\dot{I}_S - Corrente que sai da barra transmissora (ou emissora);

\dot{I}_R - Corrente que chega na barra receptora;

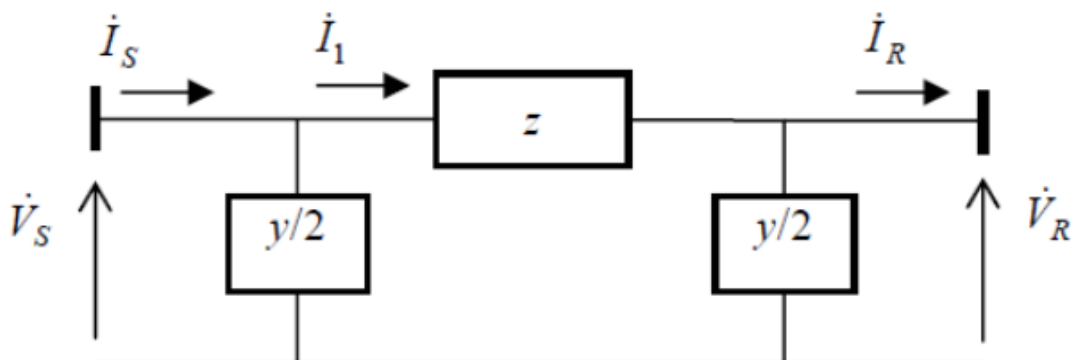
\dot{V}_S - Tensão fase-neutro da barra transmissora (ou emissora);

\dot{V}_R - Tensão fase-neutro da barra receptora.

2.3.3 Linha De Transmissão Média

As linhas de transmissão médias são consideradas com comprimento de 80 km até 240 km, nessa classificação são considerados os efeitos capacitivos das linhas, incluindo a susceptância capacitiva em derivação e ainda a é desconsiderado a condutância em derivação. A linha é representada pelo modelo π e a capacitância da linha é concentrada em ambas as extremidades e dividida por 2 como mostra a figura 5.

Figura 5 - Linha De Transmissão Média Modelo π



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

A tensão na barra transmissora é dada por:

$$\dot{V}_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \cdot \dot{V}_R + Z \cdot \dot{I}_R$$

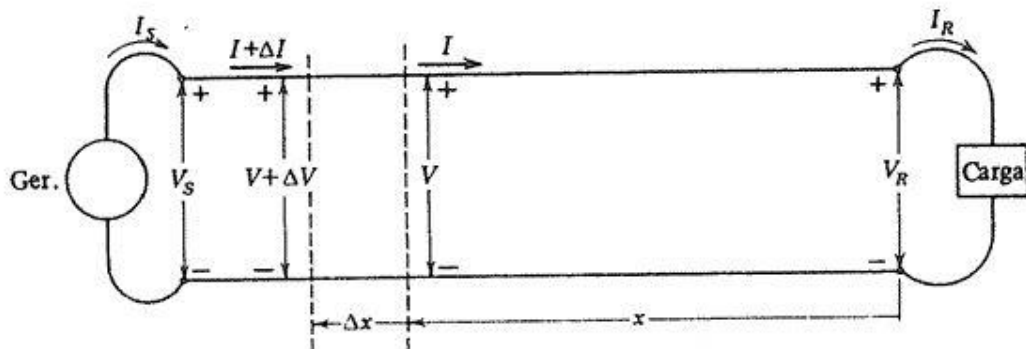
Temos eu a corrente da transmissora é:

$$\dot{I}_S = \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) \cdot Y \cdot \dot{V}_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \cdot \dot{I}_R$$

2.3.4 Linha De Transmissão Longa

Tendo que as linhas longas são consideradas com comprimentos maiores que 240 quilômetros, temos seu diagrama simplificado na figura 6 e segundo (FUCHS, 1977) linhas longas são aquelas cujo cálculos das linhas curtas e médias são considerados insuficientes para os fins desejados.

Figura 6 - Diagrama Simplificado Da Linha De Transmissão Longa



Fonte: encurtador.com.br/kvAV1

Podemos supor que a impedância está distribuída uniformemente ao longo da linha assim como a admitância, pois, assim facilitará o cálculo das correntes e tensões da linha longa e iremos ter as equações destas como:

$$\dot{I}_S = \left(\frac{\dot{V}_R/Z_C + \dot{I}_R}{2} \cdot e^{\gamma x}\right) + \left(\frac{\dot{V}_R/Z_C - \dot{I}_R}{2} \cdot e^{-\gamma x}\right)$$

$$\dot{V}_S = \left(\frac{\dot{V}_R + Z_C \cdot \dot{I}_R}{2} \cdot e^{\gamma x}\right) + \left(\frac{\dot{V}_R - Z_C \cdot \dot{I}_R}{2} \cdot e^{-\gamma x}\right)$$

Onde, temos a impedância e admitância como:

$$Z_C = \sqrt{Z/Y}$$

$$\gamma = \sqrt{ZY}$$

Obtemos sua forma hiperbólica através das equações:

A tensão na barra transmissora é dada por:

$$\dot{V}_S = \dot{V}_R \cdot \cosh \gamma x + Z_C \cdot \dot{I}_R \sinh \gamma x$$

A corrente da transmissora é:

$$\dot{I}_S = \dot{I}_R \cdot \cosh \gamma x + \frac{\dot{V}_R}{Z_C} \sinh \gamma x$$

As linhas longas para medir valores na extremidade das linhas utilizam o método π ou T.

3. BANCADA GTD

3.1 DESCRIÇÃO

Uma Bancada estruturada para simulação de Geração Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica com proteção, constituída por uma estrutura em alumínio e MDF, onde há possibilidade de movimentações sobre rodízios. Essa bancada possui vinte e quatro módulos para os inúmeros tipos de testes e simulações de transmissão, monitoramento, distribuição e proteção. Dentro do presente conjunto, ainda está preparado para um motor gerador para simular a geração de energia elétrica. Onde a máquina matriz deste gerador, é um motor elétrico alimentado por uma tensão trifásica com 220 Vca, apresentando potência aplicada no eixo do gerador até 1 CV.

3.2 ESTRUTURA DA BANCADA

A estrutura da bancada pode ser visualizada na figura 7, e podemos perceber por ela que a bancada confeccionada em alumínio anodizado possuindo um retoque e reforço estrutural, é utilizado MDF para o acabamento estrutural, apoio para módulos e rodízios giratórios com freio para a movimentação da bancada. Uma superfície plana e estável é a mais adequada para a instalação da bancada, sem apresentação de nenhuma ocorrência de intempérie e possuir a

devida conexão a uma rede elétrica com tensão trifásica 220 Vca, comportando uma carga de até 6 A.

Figura 7 - Estrutura da Bancada



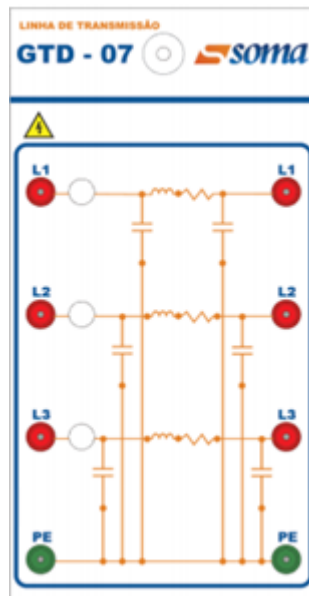
Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3 MÓDULOS

3.3.1 Módulo De Linhas De Transmissão

O modulo de linha de transmissão, que pode ser visualizado na figura 03, simula uma linha de transmissão que possui distância de 100 km, onde há a possibilidade de fazer uma conexão entre três módulos deste tipo em série, podendo formar linhas médias que possam possui 100 ou 200 km e simular também uma linha longa (300 km). Para seu funcionamento adequado estes devem ser ligados em tensão de linha 440Vca e comportem uma carga máxima de 3 A.

Figura 8 - Módulos de Linhas de Transmissão (GTD -07)



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.2 Módulos Analisadores De Energia

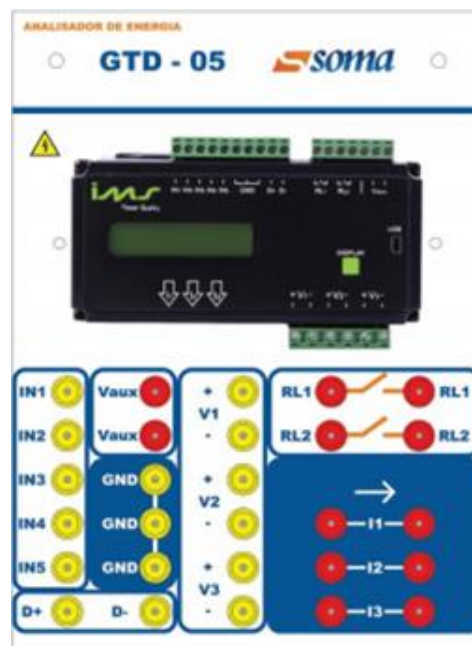
A bancada possui dois módulos analisadores de energia com o PowerNet T-500. Importantes medições de variáveis elétricas podem ser feitas com o PowerNet T-500, como tensão e corrente True RMS, frequência e THD. Observando a Tabela 1, é importante ficar atento as tensões nominais, que devem ser respeitadas para as instalações dos Módulos. Por exemplo, o limite de medição para a tensão de linha é de 500. Para informações sobre outras entradas, e quais são os seus limites é necessário ter acesso ao manual do produto. Como estamos lidando com um dispositivo bastante sensível, foi necessário a utilização de um multiplicador de corrente TC de fator 10. Com isso temos a possibilidade, em medições de corrente, potência ativa e reativa serão obtidas em valores até 10 vezes maior.

Tabela 1 - Tensões Nominais de PowerNet T-50

Parâmetros	Descrição	Tensão nominal
Vaux	Alimentação A C	70 até 300 Vca
V1	Tensão de Fase 1	28,9 até 289 V
V2	Tensão de Fase 2	28,9 até 289 V
V3	Tensão de Fase 3	28,9 até 289 V
I1	Corrente de Fase 1	1 até 150 A
I2	Corrente de Fase 2	1 até 150 A
I3	Corrente de Fase 3	1 até 150 A

Na utilização do Módulo analisador de energia, que está representado na Figura 9, podemos contar com uma conexão a o software PowerManager(fabricante: IMS). Esta ferramenta SOMA contém uma licença PRO que pode ser adquirida através de um CD que é oferecido juntamente com o manual. A versão trial da mesma forma pode ser usada e está disponível para download, onde é necessário somente criar login em: <http://www.ims.ind.br/>. Neste mesmo site também se obtém acesso ao Manual de uso do software. Como dito inicialmente, esse modulo possui dois itens para que haja a possibilidade de que sejam conectados em pontos diferenciados, fazendo com que se tem um aprimoramento na análise e distribuição de energia.

Figura 9 - Analisador de Energia (GTD- 05)

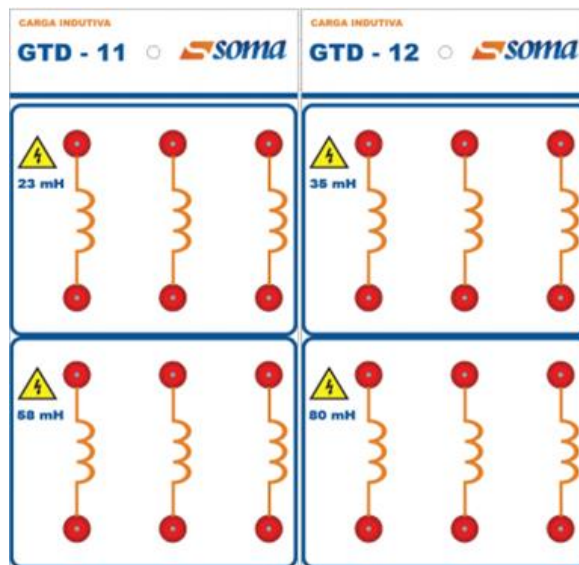


Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.3 Módulos De Carga Indutiva

Na Figura 10, são apresentados os módulos de carga indutiva, onde é importante ficar atento que estes jamais podem ser ligados diretamente com o gerador sem a presença de uma carga resistiva, para evitar que aconteça danos ao gerador. Na leitura do manual é possível a visualização das conexões dos exemplos de experiências contidas, que salientam a informação descrita anteriormente. Especificações importantes no uso dos indutores são que projetados para tensão de 110 V e corrente de 2 A. É significativo que a conexão Delta não seja realizada com resistores de $30\ \Omega$, para que algum elemento seja deteriorado.

Figura 10 - Módulos de Carga Indutiva (GTD-11 e GTD-12)



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

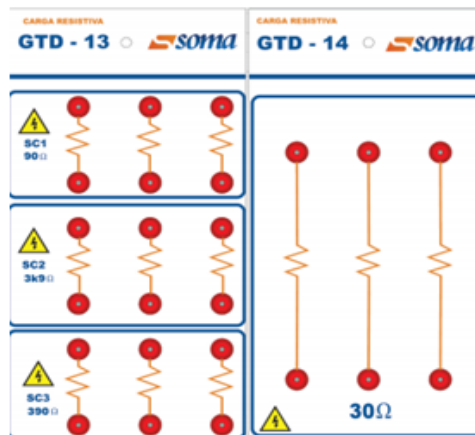
3.3.4 Módulos De Carga Resistiva

Os módulos de resistores, vistos na Figura 11, são idealizados para serem utilizados com as potências exibidas na Tabela 2. Deve se atentar ao fato de que, portanto, os resistores de $30\ \Omega$ não podem ser conectados em Δ .

Tabela 2 - Limites Tensão e Corrente das Cargas Resistivas

Carga/Limites	Conexão	Tensão (V)
30 Ω	Y	110
90 Ω	Δ ou Y	110
390 Ω	Δ ou Y	110
3900 Ω	Δ ou Y	110

Figura 11 - Módulos de Carga Resistiva (GTD-13 e GTD-14)

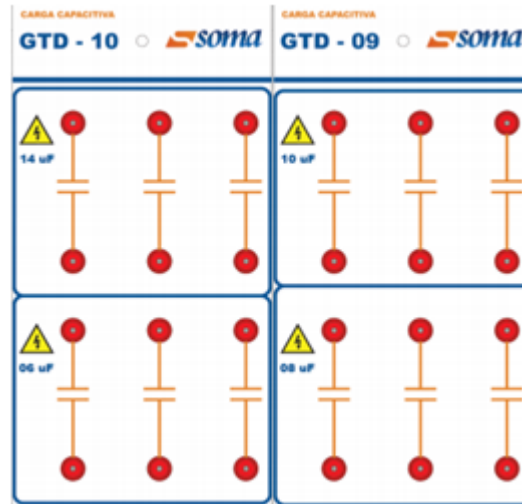


Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.5 Módulos De Carga Capacitiva

Os módulos de capacitores, vistos na Figura 12, são constituídos por 18 capacitores, organizados em dois módulos de cargas capacitivas diferentes. Sua tensão nominal é de 110 V. É significativo ficar atento que estes módulos jamais podem ser ligados diretamente com o gerador sem a presença de uma carga resistiva, para evitar que aconteça danos ao gerador.

Figura 12 - Módulos de Carga Capacitiva (GTD-10 e GTD-09)



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.6 Módulo De Proteção E Seccionamento

O módulo de proteção, visualizado na Figura 13, é constituído por alguns componentes elétricos como uma chave seccionadora, disjuntor termomagnético, botoeira de emergência, disjuntor residual, botão de rearme, indicadores de led e duas tomadas que possuem saída com tensão de 110 Vca. Necessariamente precisa ser alimentado com rede de tensão linha 220 Vca, e este modulo é responsável diretamente por importantes proteções do sistema, como contra curto-circuito, sobrecarga e fuga de corrente.

Figura 13 - Módulo de Proteção e Seccionamento (GTD-01)



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.7 Módulo Inversor De Frequência

O modulo inversor de frequência, visualizado na Figura 14, é extremamente necessário para a utilização do motor pois o mesmo é utilizado para controlá-lo, ou seja, seria sua máquina motriz, sendo este quem impulsiona o gerador. Sua alimentação correta é com 220 Vca, e para seu adequado funcionamento é necessário à sua parametrização com os dados contidos na placa do motor, tendo como ligação elétrica aplicada no motor em Δ . Sua operação só será permitida após a inserção de todos os dados contidos na placa de informações do motor. A visualização dos parâmetros é feita no painel on-board, e para um melhor auxílio o seu manual está em anexo.

Figura 14 - Módulo Inversor de Frequência (GTD -02)



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.8 Módulo Do Relé Falta De Fase

O módulo relé falta de fase, visualizado na Figura 15, tem como indicado para sua alimentação uma tensão trifásica de 220 Vca. Este componente funciona em conjunto com um contator, fazendo o controle de uma linha de transmissão trifásica para que se houver falha em alguma das fases, o mesmo realize a proteção do sistema.

Figura 15 - Módulo do Relé Falta de Fase (GTD-06)



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.9 Módulo Moto-Gerador

O módulo moto-gerador, visualizado na Figura 16, faz o acompanhamento e a avaliação do sistema de geração. Este módulo traz o benefício de podermos monitorar a tensão de saída do gerador, de acordo com a conexão empregada na saída do gerador. Em sua composição temos: um tacômetro com sensor localizado próximo ao eixo do moto gerador, um medidor de tensão monitorando a saída de tensão de excitação do gerador, um medidor de corrente monitorando a corrente de excitação do gerador e um controlador de excitação do campo do gerador. É interessante ressaltar que devem ser respeitados os extremos de tensões de operação, que são indicados na Tabela 3, para que não haja avarias nos componentes. A conexão deste módulo é feita de forma direta ao sistema de geração por sistema de conexão rápida peculiar, que pode ser encontrada na seção posterior do módulo. Para um funcionamento adequado e seguro, é

indicado que esta conexão seja verificada anteriormente a realização de energização da bancada.

Tabela 3 - Tensões De Alimentação Do Módulo Moto-Gerador

Contatos	Tensão
L1 – L2	220V
Alimentação - Motor	220V

Figura 16 - Módulo Moto-Gerador (GTD-03)



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.10 Módulo Medidor De Tensão Do Gerador

O módulo medidor de tensão, visualizado na Figura 17, tem em sua composição um medidor de tensão PowerNET M-200. É significativo que para sua adequada instalação e seu funcionamento desejado, sejam consideradas as tensões nominais apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Tensões e Correntes Nominais para PowerNet M-200

Parâmetros	Descrição	Tensão nominal
Vaux	Alimentação A C	70 até 300 Vca
V1	Tensão de Fase 1	28,9 até 289 V
V2	Tensão de Fase 2	28,9 até 289 V
V3	Tensão de Fase 3	28,9 até 289 V
I1	Corrente de Fase 1	1 até 150 A
I2	Corrente de Fase 2	1 até 150 A
I3	Corrente de Fase 3	1 até 150 A

Figura 17 - Módulo medidor de tensão de gerador (GTD-15)

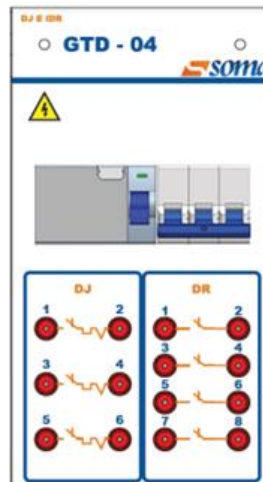


Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.11 Módulo de Proteção DJ e IDR

O módulo DJ e IDR, visualizado na Figura 18, é constituído por um disjuntor termomagnético que resiste a uma carga que pode chegar até 6 A e um disjuntor residual que suporta carga até 25 A e corrente residual de 30 mA.

Figura 18 - Módulo DJ e IDR(GTD-04)

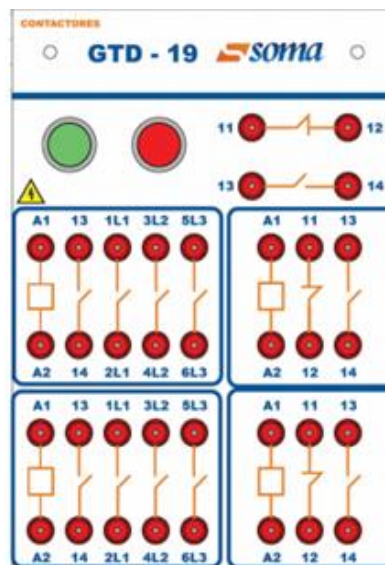


Fonte: encurtador.com.br/DGH39

3.3.12 Módulo De Contatores

O módulo de contatores, visualizado na Figura 19, tem como principal função a simulação da ação do acionamento de disjuntores em linhas de transmissão, que servem para a abertura dessas linhas. E este módulo é constituído por dois contatores auxiliares que possuem bobinas 24 Vcc e dois contatores com bobinas 24 Vcc, que trabalham em tensão de linha com até 380 Vca e corrente de até 9 A.

Figura 19 - Módulo de Contatores (GTD-19)



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

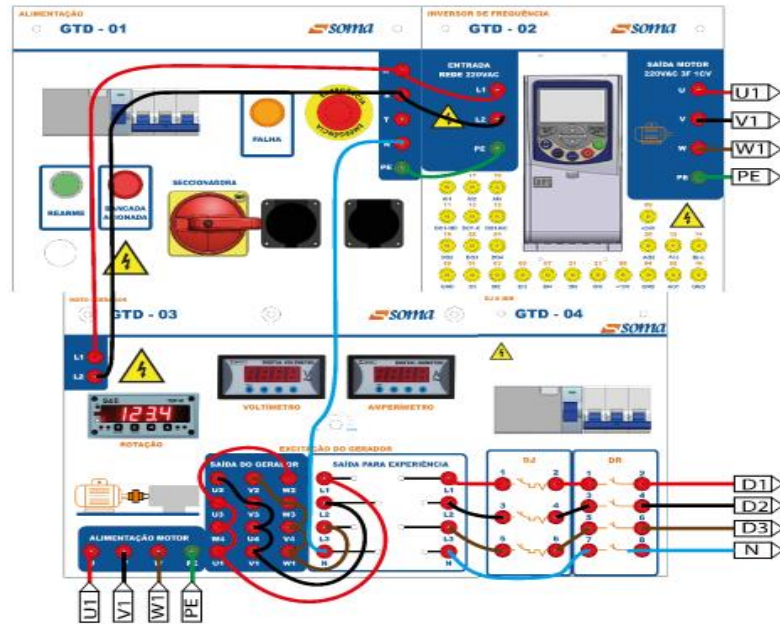
4. EXPERIMENTO

4.1 PRÁTICA PARA ANÁLISE DE PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO POR ANALISADORES DE ENERGIA

Inicialmente foram realizadas as ligações padrões da Bancada de acordo o manual disponibilizado pela empresa SOMA que é a empresa fabricante da bancada didática GTD e que está na figura 20. Usamos estrutura de conexões de acordo com o manual para realizar a montagem do circuito equivalente da linha de transmissão como verificado na figura 21. Ligamos dois módulos de linha de transmissão na figura 6 em série para simular a linha média de transmissão que de acordo com o manual cada módulo simula 100kM de distância da linha e o padrão pra ser considerado linha média é entra 80 à 240kM usando 2 módulos temos um total de 200kM e simulando a Linha de transmissão longa usamos 3 módulos que equivale a 300kM, e não havendo módulo de até 80kM que seria a maior distância para considerar uma linha de transmissão curta, não foi possível realizar a medição dos parâmetros da curta devido à falta de módulo didático para tal finalidade, mas, posteriormente iremos dimensionar um modulo para que seja realizada sua confecção e assim simular a linha de transmissão curta na bancada didática.

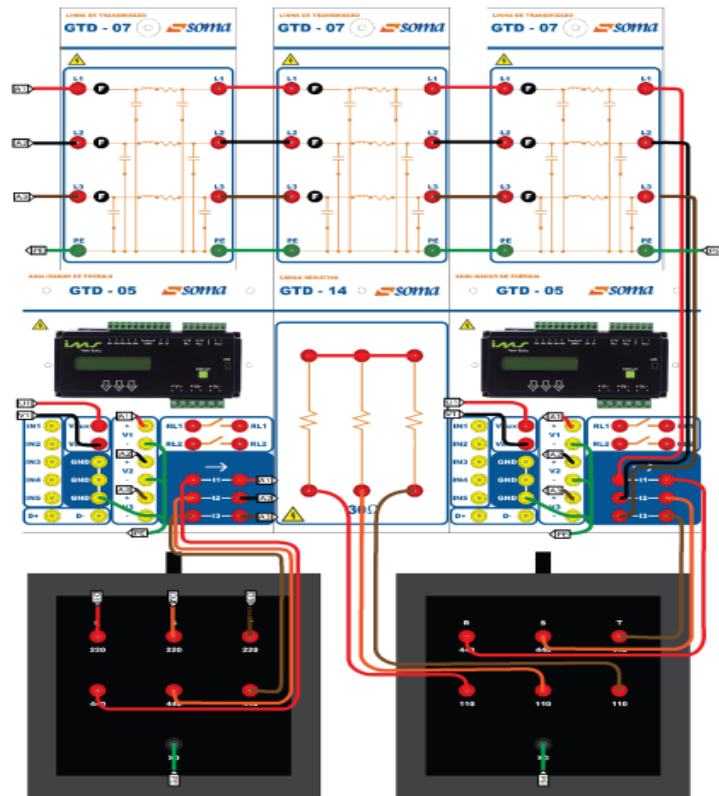
Na Bancada GTD teve-se realizada a medição dos parâmetros das linhas transmissão de média e longa no qual é mostrado na tabela 5 e tabela 6 abaixo que os dados das grandezas foram coletados através de dois analisadores de energia em que um analisador coletou os sinais de entrada da linha de transmissão e o outro analisador coletou na saída da linha de transmissão.

Figura 20 - Instalação Do Circuito Base Utilizados Em Todos Os Experimentos



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

Figura 21 - Instalação Para Análise Das Grandezas Das Linhas De Transmissão



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

Tabela 5 - Medição Das Grandezas Elétricas Da Linha De Transmissão Média

Média Entrada	L1	L2	L3	Média Saída	L1	L2	L3
U[V]	378,4	376,8	344	U[V]	370,9	347,4	358,1
U[V]	203	209,8	213,3	U[V]	214,6	196,5	212,8
I[A]	4,34	5,094	4,66	I[A]	4,732	5,004	4,648
P[W]	928,2	922,7	1,08k	P[W]	1,016k	906,8	1,027k
Q[VAR]	158,9	137,3	194,8	Q[VAR]	229,5	158	327,9
S[VA]	977	1,095k	918,2	S[VA]	949,1	1,103k	933,9
FP	0,98i	0,99i	0,99i	FP	0,97i	0,99i	0,96i
	Nominal				Nominal		
IN[A]	61,3m			IN[A]	108m		
P[KW]	2,91			P[KW]	2,94		
Q[KVAR]	0,52			Q[KVAR]	0,62		
S[KVA]	2,99			S[KVA]	3		
FP	0,98i			FP	0,97i		
Pd[W]	1,908k			Pd[W]	763,5		
Qd[VAr]	290,5			Qd[VAr]	163,6		

Tabela 6 - Medição Das Grandezas Elétricas Da Linha De Transmissão Longa

Longa Entrada	L1	L2	L3	Longa Saída	L1	L2	L3
U[V]	336,9	339,2	355,2	U[V]	332,5	359,4	340,4

U[V]	213,6	194,8	194,4	U[V]	211,5	189,6	197,0
I[A]	4,436	4,772	4,272	I[A]	4,571	4,315	4,805
P[W]	871,1	980	801,2	P[W]	762	919,4	928,3
Q[VAR]	155,1	193,4	146,2	Q[VAR]	161,4	139,7	176,8
S[VA]	948,6	947,3	827,4	S[VA]	810,6	998	860,9
	Nominal				Nominal		
IN[A]	58,28			IN[A]	103,6m		
P[KW]	2,62			P[KW]	2,67		
Q[KVAR]	0,2			Q[KVAR]	0,53		
S[KVA]	2,63			S[KVA]	2,73		
FP	1			FP	0,98		
Pd[W]	2,342K			Pd[W]	1,098k		
Qd[VAr]	100,6			Qd[VAr]	200,4		

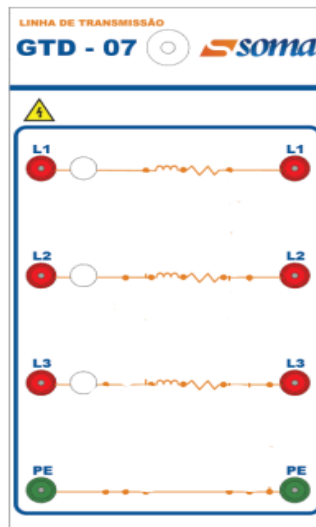
4.2 DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE LINHA DE TRANSMISSÃO CURTA

Utilizamos o módulo da linha de transmissão média de 100km como base para os desenvolver parâmetros da linha de transmissão curta.

O módulo da linha de transmissão média possui 3 resistores de $0,56\Omega$, 6 capacitores de $0,22\ \mu\text{F}$ e 3 indutores de $1,36\ \mu\text{H}$. No módulo de linha de transmissão curta iremos desconsiderar o capacitor, pois seu valor em curta é desprezível como visto anteriormente.

Logo optaremos em obter um resistor comercial de $0,27\Omega$ e $0,68\mu\text{H}$ que seria metade do valor do resistor e indutor de média e com isso teremos uma distância do modulo de linha de transmissão de curta como mostra a figura 22 que simula aproximadamente 48kM que é aceitável para uma linha curta.

Figura 22 - Módulo de Linhas de Transmissão curta

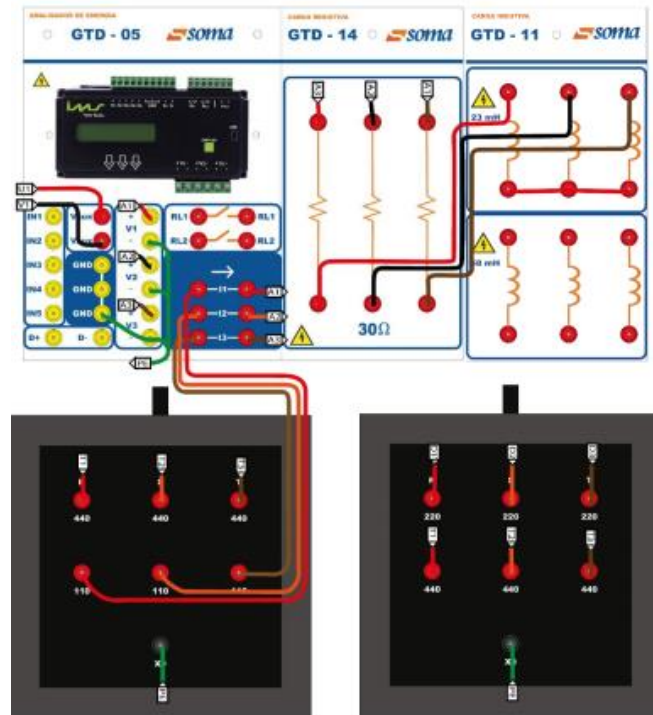


Fonte: encurtador.com.br/DGH39

4.3 PRÁTICA BALANCEAMENTO DE CARGA

Em um sistema trifásico balanceado, o circuito trifásico pode ser aproximado por um circuito equivalente monofásico. A conexão da linha de transmissão é considerada ideal, unindo as saídas de ambos transformadores, as conexões estão na figura 23.

Figura 23 - Conexão Completa em 220V fase-fase para Prática Balanceamento de Carga



Fonte: encurtador.com.br/DGH39

Utilizaremos o circuito monofásico para analisar influência da inserção de indutores no Fator de Potência, utilizando as fórmulas:

$$FP = \cos\phi = \frac{P(W)}{S(VA)}$$

$$XL = XIm = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$XC = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

$$Q = \frac{V^2}{XC}$$

Na tabela 7 temos fator de potência para os Indutores conectados em série com resistores de 30 Ohm. No cálculo do fator de potência teórico, considere indutância de 10 mH para o IMS400. Os dados teóricos e experimental estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Fator De Potência Teórico E Experimental

	FP Teórico	FP Experimental
Indutor 23 mH em série com 58 mH	0,66i	0,66i
Indutor 23 mH em série com 80 mH	0,47i	0,48i

No cálculo do fator de potência teórico, considere indutância de 10 mH para o IMS400. Considere o banco de correção de fator de potência de 25 uF. Os dados teóricos e experimental estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Fator De Potência Teórico E Experimental Com Banco De Resistores

	FP Teórico	FP Experimental
Indutor 23 mH em série com 58 mH	0,74i	0.80i
Indutor 23 mH em série com 58 mH	0,96i	0,97i

4.4 PARAMETRIZAÇÃO E ENSAIOS DO RELÉ SEL 421

4.4.1 Relé De Proteção Sel 421

O SEL-421 contém todos os elementos de proteção e lógicas de controle necessários para proteger linhas de transmissão aéreas e cabos subterrâneos. O relé mede simultaneamente cinco zonas de proteção de distância mho de fase e terra e cinco zonas de proteção de distância de terra quadrilateral. Esses elementos de distância, em conjunto com os elementos opcionais direcionais 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 (“Communications assisted protection schemes”) segundo o Manual (SEL 421, 2011).

Funções de Proteção:

- 50/51 - Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51G - Sobrecorrente residual instantânea e temporizada;
- 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 sequência 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 sequência negativa;
- 50/62BF - Falha de disjuntor para até dois disjuntores;
- 60 - Perda de potencial;
- 81 - Sub/Sobrefrequência, taxa de variação de frequência df/dt ;
- 49 – Sobrecarga por imagem térmica;
- 87V – diferencial de tensão para banco de capacitores de AT (por lógica);

4.4.2 Parametrização Do Relé

O software ACSELERATOR QuickSet foi utilizado para realizar ajustes e parametrização do relé (modelo SEL 421) no qual sua comunicação com o relé se teve pela porta serial conectada no relé e no notebook. A Figura 24 mostra a tela principal deste aplicativo ACSELERATOR QuickSet.

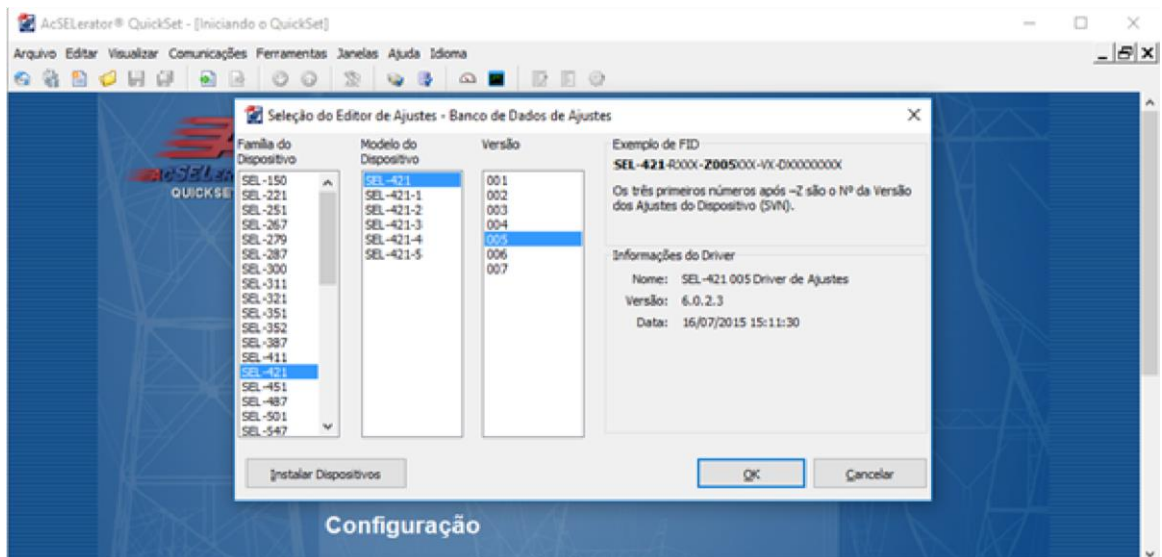
Figura 24 - Tela Inicial do AcSELeRator QuickSet



Fonte: Autoria própria.

O primeiro passo para iniciar a configuração foi clicar na opção “Novo” do menu inicial, no qual abriu uma janela “Seleção do editor de ajustes”, de acordo Figura 25, no qual selecionou o dispositivo SEL 421 na versão 5.

Figura 25 - Tela de Seleção do Relé.



Fonte: Autoria própria.

Clicando em “Ok”, abriu uma nova janela, com o nome “Part Number do Dispositivo”, em que foi colocado *Part Number* (P/N) 042136152COXH21XXXXX do relé como mostra a figura 26, este número de série do relé e está uma etiqueta colada na parte trás do relé.

Figura 26 - Formulário “Part Number”.

Part Number do Dispositivo

Part Number: 0421 0415X11XXH *

Firmware:
0 = Standard Plus Subcycle Elements, Series Compensation Lr

Power Supply:
4 = 48/125 Vdc or 120 Vac

Connector Type:
1 = Screw Terminal Block

Secondary Inputs:
5 = 300V Phase - Neutral Maximum (wye), 5 Amp Phase

Ethernet Card Options:
X = None

Communications Protocol:
1 = SEL ASCII, Compressed ASCII, and Settings File Transfer.

Chassis:
1 = 3U, Standard I/O

I/O Board Slot B for 4U or 5U Chassis:
N/A

I/O Board Slot C 5U Chassis Only:
N/A

Mounting:
H = Horizontal Rack Mount

Editar OK

Fonte: Autoria própria.

Clicando na opção “Global” e em seguida “General Global Settings”, aparece um formulário em que é preenchido de acordo com a Figura 27.

Figura 27 - Formulário “General Global Settings”

AcSELEerator® QuickSet - [Editor de Ajustes - 50P1 (SEL-421-3-100 v6.8.1.0)]

Arquivo Editar Visualizar Comunicações Ferramentas Janelas Ajuda Idioma

General Global Settings

General Global Settings

SID Station Identifier (40 characters)
Station A

RID Relay Identifier (40 characters)
Relay 1

NUMBK Number of Breakers in Scheme
 1 2

BID1 Breaker 1 Identifier (40 characters)
Breaker 1

BID2 Breaker 2 Identifier (40 characters)
Breaker 2

NFREQ Nominal System Frequency
 50 60

PHROT System Phase Rotation
 ABC ACB

DATE_F Date Format
 MDY YMD DMY

FAULT Fault Condition Equation (SELLogic)
50P1 OR S1S1 OR M3P OR Z2G OR M3P OR Z3G

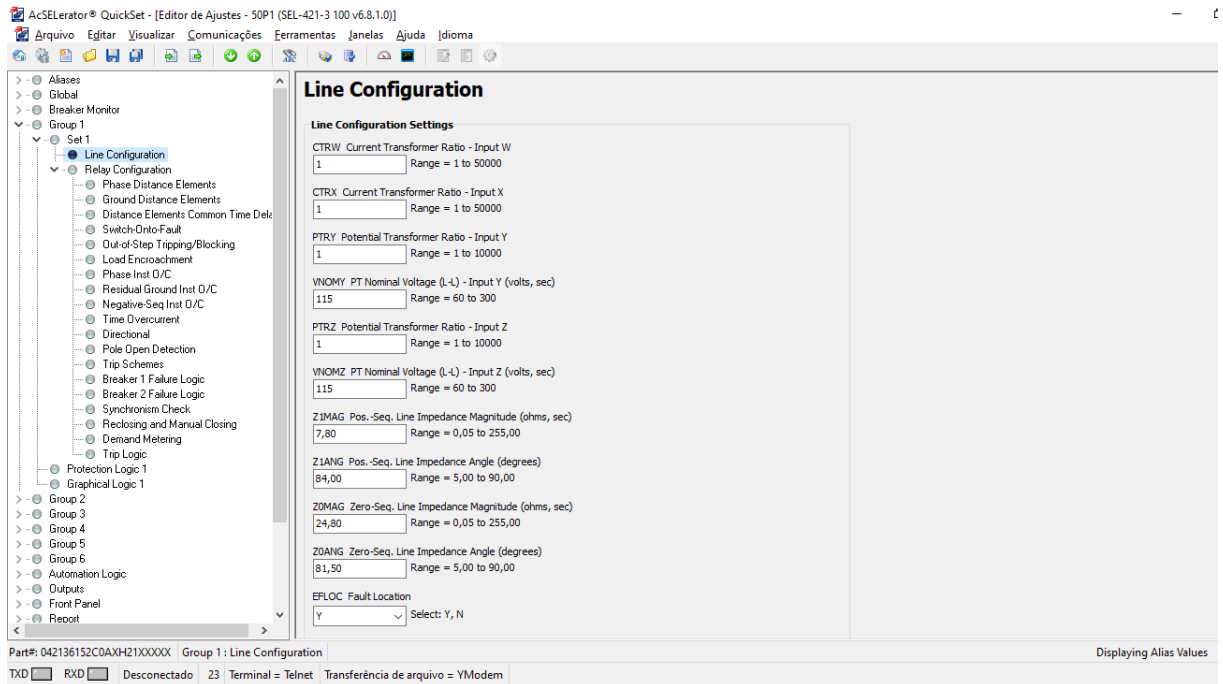
Part#: 042136152C0AXH21XXXXX Global - General Global Settings

TXD [] RXD [] Desconectado 23 Terminal = Telnet Transferência de arquivo = YModem

Fonte: autoria própria.

O próximo passo é clicar na opção “Group 1” e em seguida “Line Configuration” como mostra a figura 28, onde se tem valores inseridos como dados elétricos dos transformadores de instrumentos e da linha de transmissão.

Figura 28 - Figura 28 - Formulário “Line Configuration”

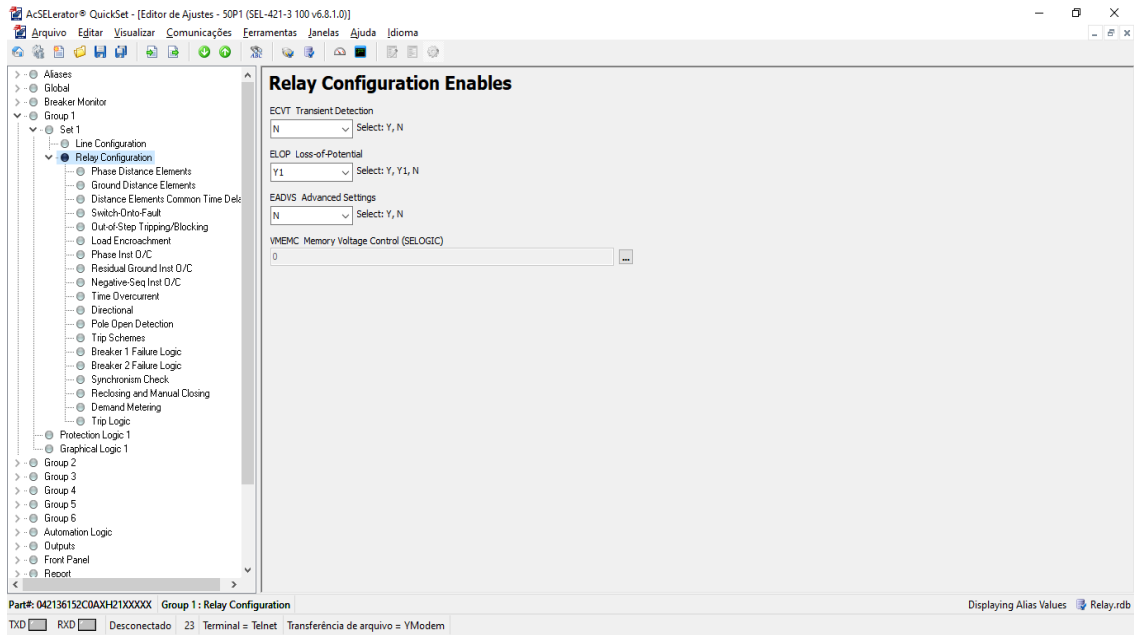


Fonte: Autoria própria

Após realizar todas as configurações gerais do relé, se inicia a etapa de parametrização específicas para cada tipo de ensaio.

Em “Relay Configuration” de acordo com a figura 29 se define as funções estão ativas. Para cada teste é de extrema importância que somente a funções para o teste em questão esteja ativa, para evitar problemas com atuações incorretas gerando incerteza nos testes.

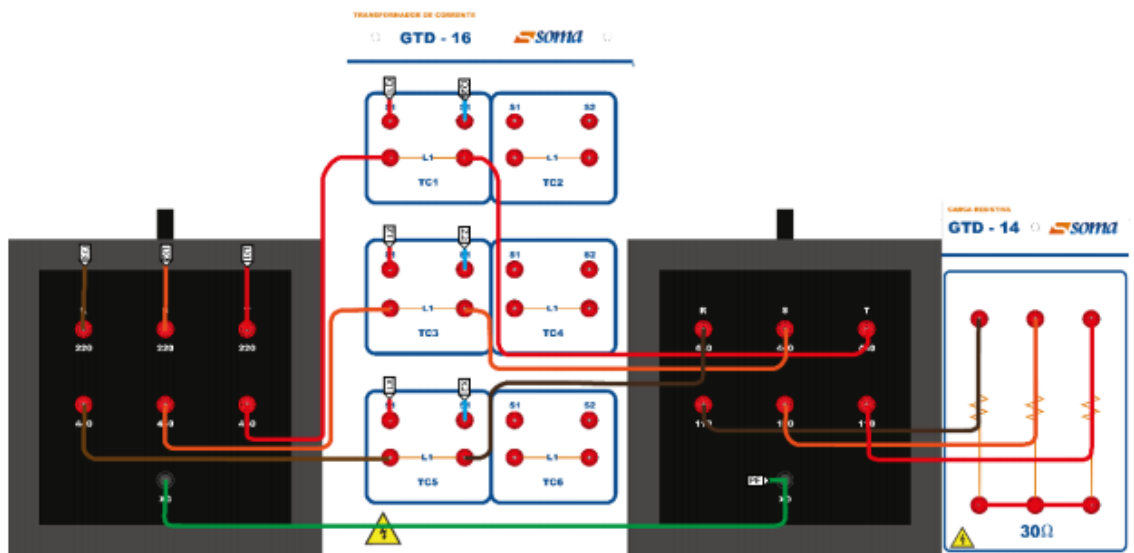
Figura 29 - Relay Configuration



Fonte: Autoria própria

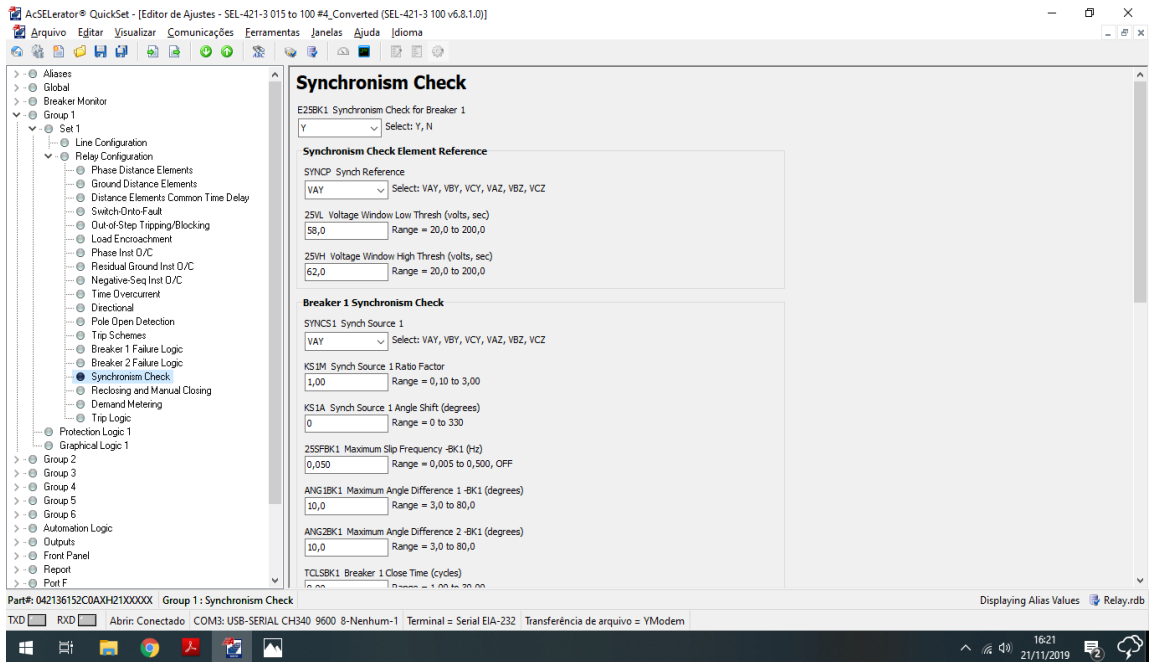
A instalação do relé SEL 421 na bancada GTD, se dá pela figura 30 e 31, lembrando que também foi utilizado a instalação do circuito base utilizados em todos os experimentos figura 19 como dito anteriormente.

Figura 30 - Instalação do Relé SEL 421 na Bancada GTD



Fonte: Autoria própria

Figura 32 - Synchronism Check



Fonte: Autoria própria

O “SYNCP (Synchronism Reference)” define a entrada de tensão monofásica, designada como referência de tensão na função de verificação de sincronismo. Na prática, a entrada de tensão designada para referência de tensão de verificação de sincronismo é a fase A da linha (VAY).

As opções “25VL Voltage Window Low Threshold” e “25VH Voltage Window High Threshold” definem o limite inferior e superior da janela de tensão que supervisiona a verificação de sincronismo. Na prática foram considerados os valores de 90% da tensão de fase para o limite inferior e 120% da tensão de fase para o limite superior.

No ajuste “SYNCS1 Synchronism Source 1” define a entrada de tensão monofásica, designada como fonte de tensão no qual irá ser acoplada ao sistema. Na simulação foi utilizada a fase A da rede.

O ajuste “KS1M Synchronism Source 1 Ratio Factor” se define o fator de compensação de modulo entre as tensões de referência com sistema 1.

Como na referência a tensão VAY com valor nominal de 115 V (fase) e o sistema dois utiliza-se VAY com valor nominal de 115 V (fase) não é necessário fazer a compensação do módulo e do ângulo então valor é 1.

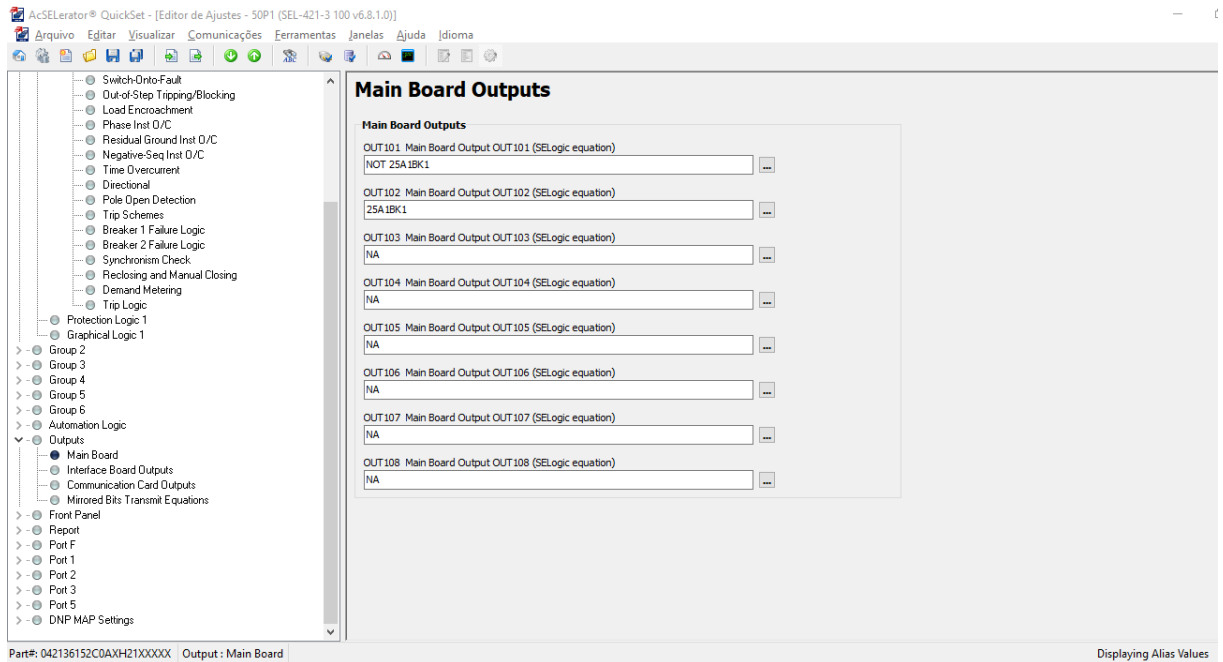
A partir desta função são padrões para os fins deste roteiro.

Tabela 9 - Checklist Função Sincronismo

Campos Ajustáveis	Valores
E25BK1	Y
SYNCP (Synchronism Reference)	VAY
25VL Voltage Window Low Threshold” e “25VH Voltage Window High Threshold”	58 e 62
SYNCS1 Synchronism Source 1	VAY
KS1M Synchronism Source 1 Ratio Factor	1
KS1A Synchronism Source 1 Angle Shift	0
25SFBK1 Maximum Slip Frequency	0,050
ANG1BK1 Maximum Angle Diference 1	10
ANG2BK1 Maximum Angle Diference 2	10
TCLSBK1 Breaker 1 Close Time	1
BSYNBK1 Block Synchronism Check	NA

Após verificar todas as configurações da tabela acima clique em “Outputs” e em seguida em “Main Board” para escolher qual saída será responsável pelo envio do sinal de trip. Nesse caso utiliza-se a “OUT 102” para trip de sincronismo e “OUT 101” para reset da saída.

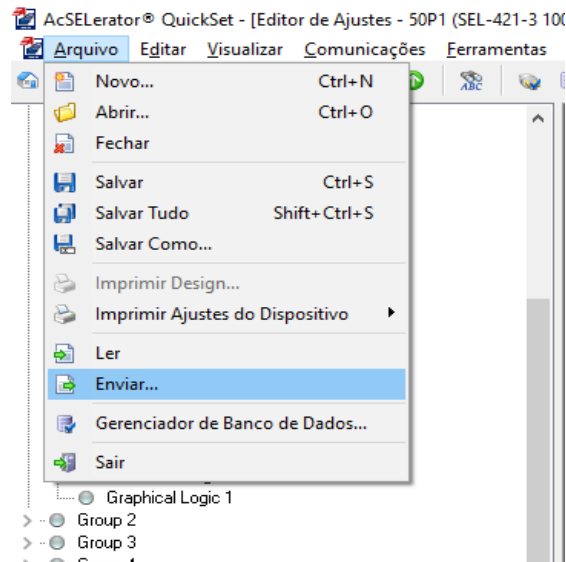
Figura 33 - Main Board



Fonte: Autoria própria

Após realizar todos os ajustes clique no ícone destacado da figura 33 para enviar as modificações para o relé como na figura 34.

Figura 34 - Envio das Configurações para o Relé



Fonte: Autoria própria

Após configurar o software e a instalação das conexões da bancada GTD e o relé SEL 421 estarem de acordo com a figura 30 e 31, sendo que na figura 31 iremos acrescentar a instalação dos pinos 19 e 20 do grupo B, que irá utilizar o sinal de tensão da fase A como referência pra

checar o sincronismo, após isso, vamos em no “Main Menu” do relé sel 421 e depois na opção “Relay Elements”, em seguida clicamos em SEARCH e digitamos “FREQOK”, e apertamos em “ENT” novamente no relé, no qual irá mostrar no seu display a opção “FREQOK” que quando aparecer “0” indicará que a frequência da linha em análise está em sincronismo e se indicar “1” a frequência da linha não está em sincronismo como pode ser verificado na figura 35 e assim o relé atuara.

Figura 35 - Detecção Da Atuação Da Função 25 No SEL 421 Na Bancada GTD



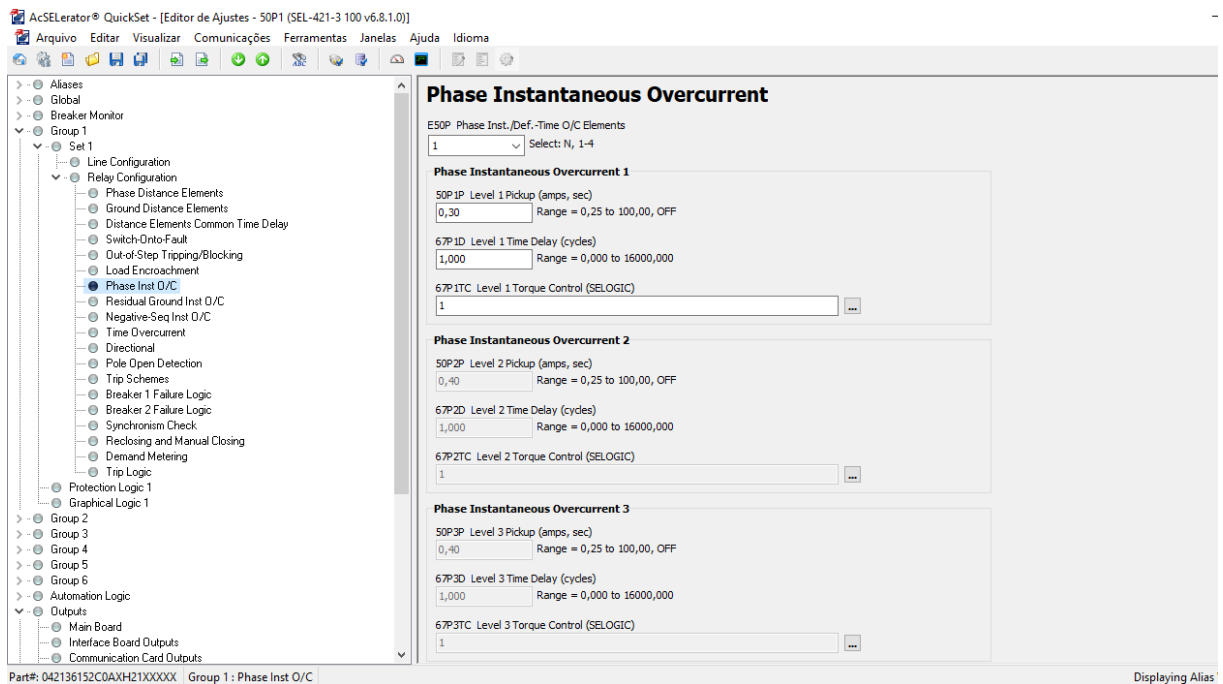
Fonte: Autoria própria

4.4.4 Função 50 Sobrecorrente Instantâneo

Nesta pratica o aluno irá verificar atuação do relé quando o mesmo identificar uma corrente acima do valor nominal da linha. Não será gerado nenhum curto ou algo do tipo. Iremos simular uma linha de transmissão média de 200 Km com uma carga de 30 ohms e verificar as condições nominais de tensão de corrente. Com esses valores programa-se o relé para atuar com uma corrente abaixo da corrente nominal do sistema e quando ativamos a função “Phase Inst O/C” que pode ser vista na figura 36 o equipamento de proteção identifica instantaneamente o erro no sistema e ativa a saída.

Para configurar a função 50 para atuação no relé em caso de sobrecorrente, deve-se ajustar os valores de corrente de pick-up e tempo de atuação na opção “Phase Inst O/C”, na guia “Relay Configuration”.

Figura 36 - Phase Inst O/C



Fonte: Autoria própria

Na opção “E50P Phase Instantaneous/Definite-Time Overcurrent Elements” se define quantidade de elementos de sobrecorrente instantâneo. Em cada elemento se define as condições no qual o relé reconhecerá a ocorrência de uma situação de sobrecorrente. Para a prática foi utilizado apenas 1 então valor é 1.

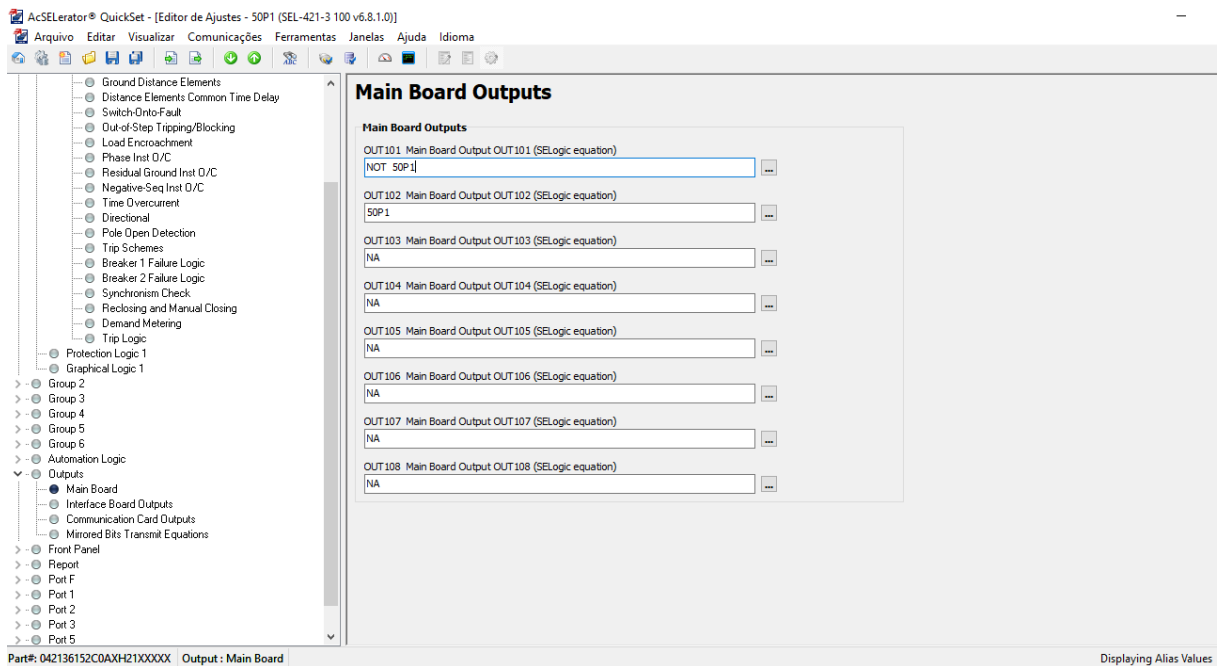
Nesta opção será “50P1P Level 1 Pickup” define-se o valor da corrente que queremos que o relé atue. A corrente nominal do sistema é 0,4 A então foi definido a corrente de atuação de 0,3 A.

A opção “67P1D Level 1 Time Delay” é destinada a definição do tempo de retardo do elemento de sobrecorrente pois como temos até 4 elementos de sobrecorrente pode-se definir tempos independentes para cada um. Será definido o tempo de atuação de 1 ciclo.

A partir desta opção as configurações da proteção de sobrecorrente instantânea são padrões.

Após verificar todas as configurações da tabela acima clique em “Outputs” e em seguida em “Main Board” de acordo com a figura 37 para escolher qual saída será responsável pelo envio do sinal de trip. Nesse caso utiliza-se a “OUT 102” para trip Sobrecorrente Instantânea e “OUT 101” para reset do trip.

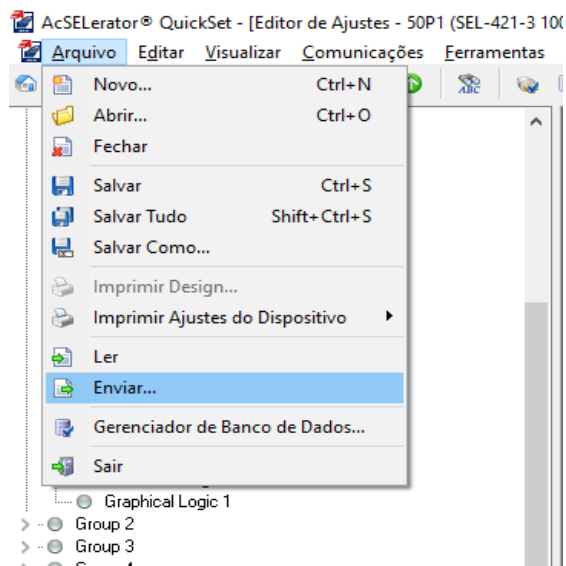
Figura 37 - Main Board



Fonte: Autoria própria

Após realizar todos os ajustes clique no ícone destacado da figura 38 para enviar as modificações para o relé.

Figura 38 - Envio das Configurações para o Relé



Fonte: Autoria própria

Após configurar o software e a instalação das conexões da bancada GTD e o relé SEL 421 estarem de acordo coma a figura 30 e 31,e como dito anteriormente que a corrente da linha A

está 0,4 ampères devido a carga resistiva de 30 Ohm ligado a uma linha de transmissão média de 200 Km e a corrente de atuação configurada é a partir de a 0,3 ampères, o relé atuará instantaneamente, quando o dado do software for enviado, podemos ir em “Main Menu” do relé sel 421 e depois na opção “Relay Elements”, em seguida clicamos em SEARCH e digitamos “50P1”, e apertamos em “ENT” novamente no relé, no qual irá mostrar no seu display a opção “50P1P” no qual indicará “0” para seu funcionamento normal e “1” quando houver uma sobrecorrente podemos ver na figura 39, ou seja, quando tiver uma corrente acima da pré definida no software o relé atuará instantaneamente.

Figura 39 - Detecção Da Atuação Da Função 50 No SEL 421 Na Bancada GTD



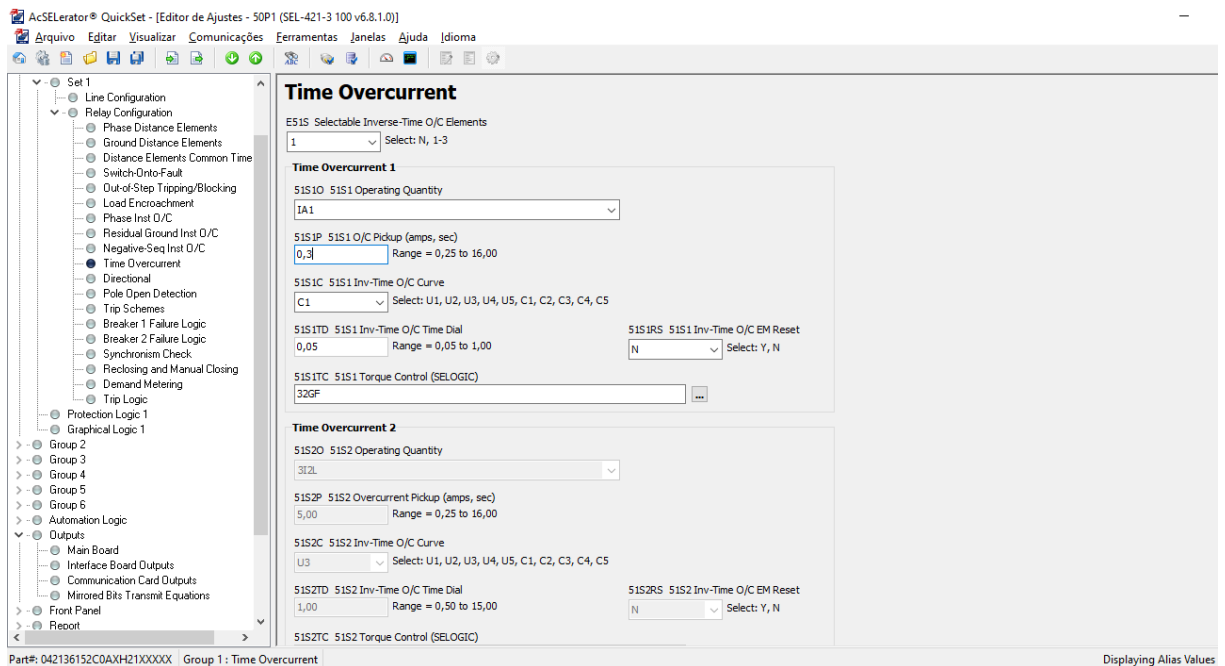
Fonte: Autoria própria

4.4.5 Função 51 Sobrecorrente Temporizada

Nesta opção ajusta-se o pickup do elemento temporizado, o dial de tempo e o tipo de curva. Salienta-se que o relé pode monitorar as correntes das 3 fases ao mesmo tempo pois ele possui 3 elementos para parametrização. Na prática vai ser monitorado apenas a corrente da fase A. A figura 40 a seguir mostra os valores dos ajustes:

No primeiro parâmetro “*E51S Selectable Inverse time*” é definido a quantidade de elementos que se define monitorar, ou seja, a quantidade de correntes que devem ser monitoradas. Na prática será monitorada apenas a corrente IA então deve-se colocar “1” neste quadro.

Figura 40 - Configurações Sobrecorrente Temporizada



Fonte: Autoria própria

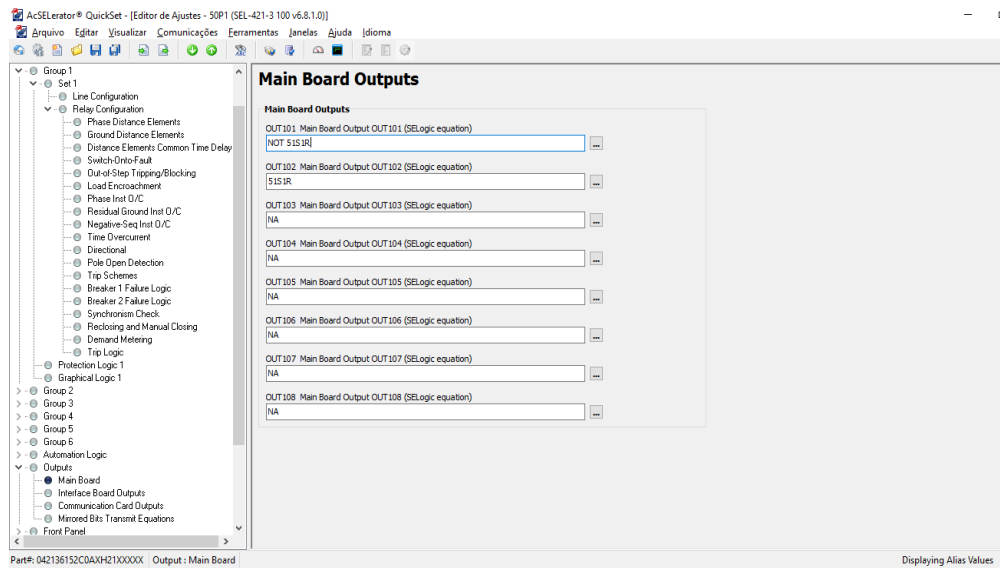
Na opção “51S1O 51S1 Operating Quantity” se define o parâmetro que o relé irá monitorar. Para a simulação o elemento escolhido será a corrente “IA1”. Após escolher determinar qual corrente irá ser monitorada deve-se definir o valor de pick-up de corrente na opção “51S1P 51S1 Overcurrent Pickup”. Iremos definir o valor de 0.3 A.

O tipo de curva para os testes deve ser definido no parâmetro “51S1C 51S1 Inverse-Time Overcurrent Curve”. Vai ser adota a curva com características Muito Inversa (C1) padrão IEC. Escolhido o tipo da curva agora se define o dial de tempo dela. Foi definido um dial de tempo de 0,05 na opção “51S1TD 51S1 Inverse-Time Overcurrent Time Dial”. A formula abaixo é referente a curva Muito Inversa, sendo M o valor da corrente de curto I_{cc} 0,4 A dividido pela corrente de pick-up I_{pk} 0,3 A. Substituindo na formula os valores do programados o tempo de atuação tem de ser aproximadamente 2 ms.

$$T = TD \cdot \frac{13,5}{(M - 1,0)} = [seg]$$

Após verificar todas as configurações seleciona a opção “Outputs” e em seguida em “Main Board” vista na figura 41 para escolher qual saída será responsável pelo envio do sinal de trip. Nesse caso utiliza-se a “OUT 102” para trip Sobrecorrente Temporizada e “OUT 101” para reset do trip.

Figura 41 - Configuração Saídas Sobrecorrente Temporizada



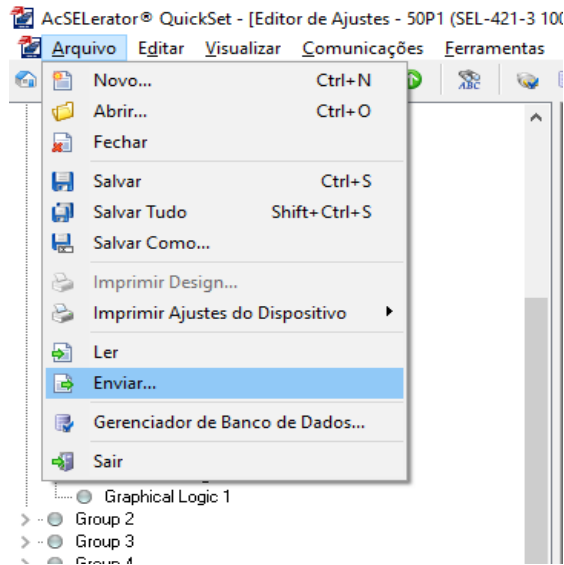
Fonte: Aatoria própria

Tabela 10 - Checklist da função de sobrecorrente temporizada

Campos Ajustáveis	Valor
E51S Selectable Inverse time	1
51S1O 51S1 Operating Quantity	IA1
“51S1P 51S1 Overcurrent Pickup	0,3
51S1C 51S1 Inverse-Time Overcurrent Curve	C1
51S1TD 51S1 Inverse-Time Overcurrent Time Dial	0,2
51S1RS 51S1 Inverse-Time Overcurrent Electromechanical Reset	N
51S1TC 51S1 Torque Control (SELogic)	32GF

Após realizar todos os ajustes clique no ícone destacado da figura 42 para enviar as modificações para o relé.

Figura 42 - Envio das Configurações para o Relé



Fonte: Autoria própria

Após configurar o software e a instalação das conexões da bancada GTD e o relé SEL 421 estarem de acordo coma a figura 30 e 31, e como dito anteriormente que a corrente da linha A está 0,4 ampères devido a carga resistiva de 30 Ohm ligado a uma linha de transmissão média de 200 Km e a corrente de atuação configurada é a partir de 0,3 ampères, o relé atuará em 2,02 segundos, quando o dado do software for enviado, podemos ir em “Main Menu” do relé sel 421 e depois na opção “Relay Elements”, em seguida clicamos em SEARCH e digitamos “51S1”, e apertamos em “ENT” novamente no relé, no qual irá mostrar no seu display a opção “51S1R” no qual indicará “0” para seu funcionamento normal e “1” quando houver uma sobrecorrente podemos ver isso na figura 43, ou seja, quando tiver uma corrente acima da pré definida no software o relé atuará.

Figura 43 - Detecção Da Atuação Da Função 51 No SEL 421 Na Bancada GTD

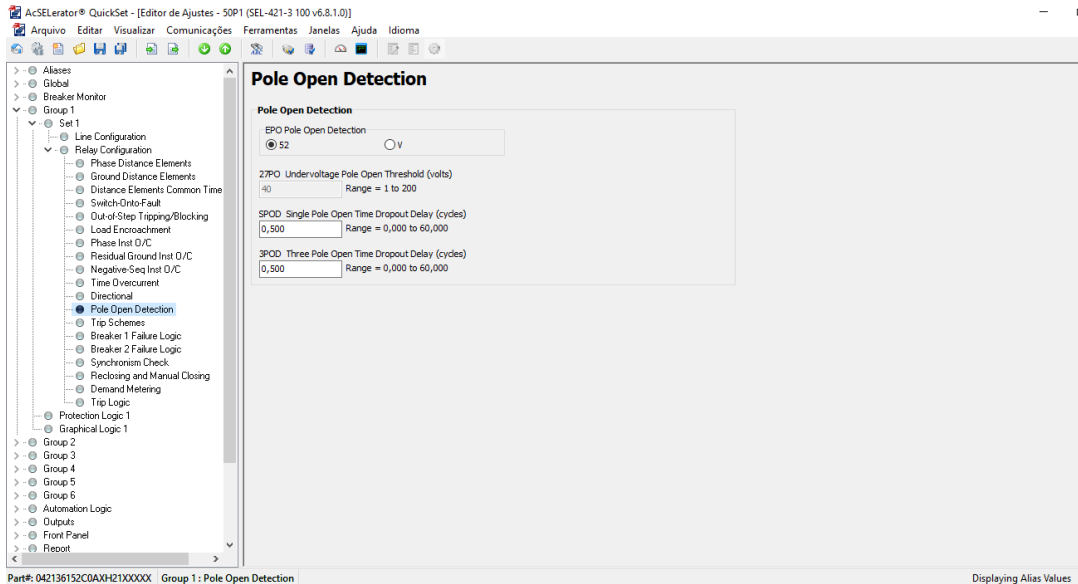


Fonte: Autoria própria

4.4.6 Função Falta De Fase

Nesta prática vai ser simulado uma falta de fase na linha retirando a fase A do sistema. A parametrização do relé consiste inicialmente em ativar a função “*Pole Open Detection*” ou detecção de pole aberto. A figura 44 abaixo demonstra a configuração da função.

Figura 44 - Configuração Função Pole Open Detection



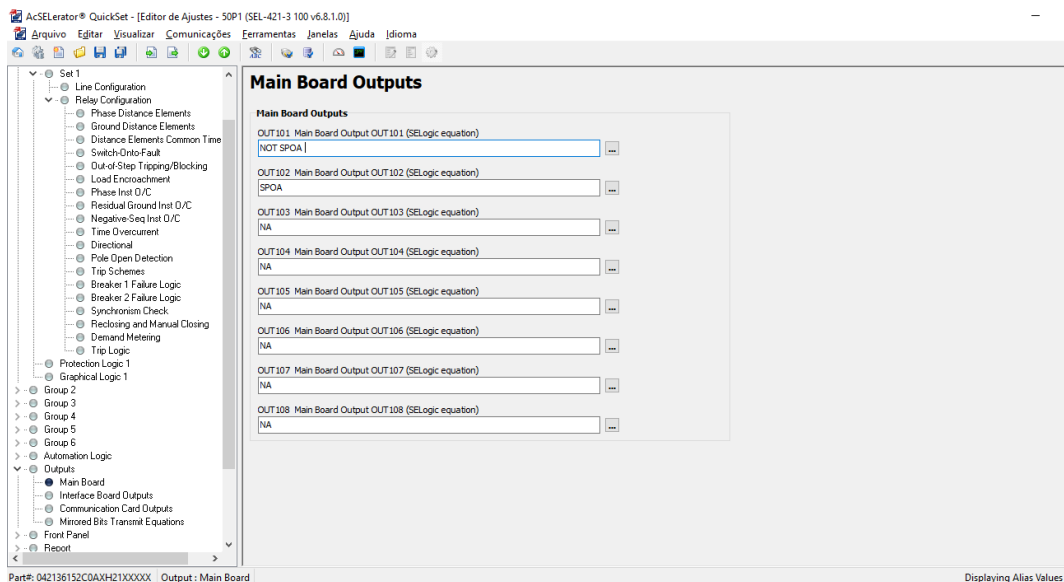
Fonte: Autoria própria

A opção “*EPO Pole Open Detection*” define as condições para detecção de polo aberto. Deve-se marcar a opção 52 devido ao fato da bancada não estar utilizando transformadores de potencial.

Nas caixas “SPOD Single Pole Open Dropout” e “3POD Three-Pole Open Dropout” são definidos o tempo de retardo para declaração de polo aberto. Essa configuração tem valores padrões de 0,5 para as duas.

Após verificar todas as configurações clique em “Outputs” e em seguida em “Main Board” para escolher qual saída será responsável pelo envio do sinal de trip. Nesse caso utiliza-se a “OUT 102” para trip falta de fase e “OUT 101” para reset do trip. A figura 45 abaixo demonstra a configuração.

Figura 45 - Configuração De Saída Para Falta De Fase



Fonte: Autoria própria

A tabela 11 de checklist abaixo mostra quais os valores devem estar em todas as configurações da simulação de falta de fase.

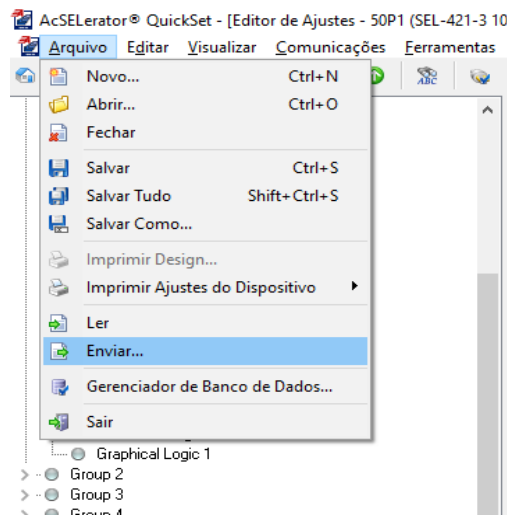
Tabela 11 - Checklist Da Função Falta De Fase

Campos Ajustáveis	Valores
<i>EPO Pole Open Detection</i>	52
SPOD Single Pole Open ropout	0,5

3POD Three-Pole Open Dropout	0,5
------------------------------	-----

Após realizar todos os ajustes clique no ícone destacado da figura 46 para enviar as modificações para o relé.

Figura 46 - Envio das Configurações para o Relé



Fonte: Autoria própria

A próxima etapa depois de configurar o software e a instalação das conexões da bancada GTD e o relé SEL 421 estarem de acordo coma a figura 30 e 31, será simular anomalia na linha de transmissão e pra isso é necessário, conectar a fase desejada a botoeira normalmente fechada do módulo “CONTACTORES GTD-19”, escolhemos a fase “A” para o relé que seria a L1 no módulo “LINHA DE TRANSMISSÃO GTD – 7”, conectamos a fase L1 que vem do final da linha de transmissão no contato 11 normalmente fechado do modulo contactores e o contato 12 normalmente fechado deste, foi conectado a uma das fases da carga resistiva de 30 Ohm, logo, para simular a falta de fase na linha L1 ou fase A é só pressionar a botoeira que o contato 11 e 12 que está normalmente fechado passa para o estado normalmente aberto e assim a linha em questão irá abrir e o relé identificará a falta de fase e atuará, para verificar a falta de fase no display do relé iremos na opção “Main Menu” do relé sel 421 e depois na opção “Relay Elements”, em seguida clicamos em SEARCH e digitamos “SPOA”, e apertamos em “ENT” novamente no relé, no qual irá mostrar no seu display a opção “SPOA” no qual indicará “0” para seu funcionamento normal e “1” como mostrado na figura 47 quando houver uma falta de fase.

Figura 47 - Detecção da atuação da função SPOA no SEL 421 na bancada GTD



Fonte: Autoria própria

5. Recomendações para trabalhos futuros

Com os roteiros de práticas elaborados, este mesmo podem ter experimentos auxiliares para melhor aproveitamento e entendimento do funcionamento como por exemplo na prática de proteção 50 na parametrização do software ACSELERATOR QuickSet na opção “50P1P Level 1 Pickup” no qual define-se o valor da corrente que queremos que o relé atue. A corrente nominal do sistema é 0.4 A. Então a corrente de atuação deverá ser 0,6 A e deve-se implementar um dj/ch para chavear e colocar uma carga em paralelo para aumentar a corrente para 0,9. Tendo essas parametrizações o relé atuara no momento do chaveamento.

Deverá a empresa obter a aquisição do software ACSELERATOR QuickSet para que as parametrizações das práticas possam ser realizadas.

Solicitar ao representante da empresa SOMA responsável pelo desenvolvimento da bancada GTD o esquema das conexões do módulo relé SIEMENS 7SR1204 para realizar a integração com a bancada e assim realizar, estudos das parametrizações do relé para realizar novos roteiros de práticas de proteção.

Para uma melhor implementação seria necessária uma compra de módulos de botoeiras para chaveamento de cargas na linha afim de verificar se o SEL 421 captaria os dados e interpretaria como um curto.

Para desenvolvimento de outras práticas com relés, o ideal seria a compra de uma maleta de testes, como por exemplo o OMICRON CMC 356, que pode simular situações de proteção e trabalharia em conjunto com relé.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É do cotidiano do engenheiro eletricitista lidar com falhas nos sistemas de GTD, detectá-las e extingui-las ou mitigá-las é necessário para uma operação limpa, segura e sem desperdícios de energia elétrica do sistema até sua chegada o consumidor final.

A partir das possibilidades de práticas apresentadas aplicadas à geração, transmissão e distribuição de energia através das simulações da bancada didática integrada com o relé digital SEL 421, haverá uma melhor experiência para os usuários da bancada sobre o tema. Assim, tanto aluno quanto professor aprenderão na prática os cenários de falhas que um sistema elétrico real pode apresentar, tudo isso em um ambiente acadêmico, seguro e intuitivo que estimula a capacidade e segurança para a tomada de decisões no ambiente de trabalho futuro.

Apresentamos neste trabalho os dispositivos de proteção e os módulos da bancada de forma instrutiva para que seja replicável a qualquer leitor interessado que os possua. Além dos roteiros para simulações das falhas, os modelos de linhas de transmissão, junto à sua fundamentação teórica para que a compreensão do trabalho seja mais ampla em cada passo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alzuhairi Mohammed. **Power System Protection Overcurrent Protective Relays**. 2016c. Disponível em: <
<https://www.philadelphia.edu.jo/academics/mlazim/uploads/Power%20System%20protection%20-%20Part%2005.pdf>>. Acesso em 22 Nov 2019.

Andrade. O que é fusível e quais suas categorias. 2017. Disponível em: <
<https://www.saladaeletrica.com.br/fusivel/>> Acesso em: 15 de out. de 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 729** de 28 de junho de 2016. 2016c. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.pdf>>. Acesso em 22 Nov. 2019.

BRIDGER, Baldwin. **Directional Overcurrent and Directional Power Relays**. Disponível em:
<https://www.powellind.com/sites/downloads/ProductAssets/01.4TB.015%20Directional%20Overcurrent%20and%20Directional%20Power%20Relays.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2019.

CAMINHA, Amadeu C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. Editora Edgard Blucher. 14.ed. 2015.

Cláudio Mardegan. Dispositivos de proteção.. Disponível em: <
http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/06/Ed51_abril_fasc_protecao_seletividade_capIV.pdf>. Acesso em 27 Nov. 2019.

CRUZ, MAURÍCIO. **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE RELÉS DE DISTÂNCIA SOB CONDIÇÃO DE SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE**. 2013. Dissertação (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa.

HOROWITZ, S.; PHADKE, A. **Power System Relaying**. John Wiley & Sons Ltd. 4. Ed. 2014.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. Memória de Cálculos para os ajustes do relé de proteção, automação e controle SEL-241. Manual SEL. 2011. Disponível em

<<http://www1.selinc.com.br/calculo/ROTEIRO%20DE%20AJUSTES%20SEL-421.pdf>>.

Acesso em: 10 nov. 2019.

SILVA, Eliel Celestino. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência – Guia Prático de Ajustes**. Editora Qualitymark Ltda. 2014.

STEVENSON, William D. JR; GRAINGER, J. J. **Power System Analysis**. Editora McGraw-Hill International Electrical Engineering Series, 1994.