



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GILCÉLIA DO AMARAL DA SILVEIRA

OTIMIZAÇÃO DE ELABORAÇÃO DE ESTUDO DE COORDENAÇÃO E
SELETIVIDADE EM REDES DE MÉDIA TENSÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUIDA
UTILIZANDO FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

MOSSORÓ

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S587o Silveira, Gilcélia do Amaral da Silveira.
Otimização de elaboração de estudo de coordenação
e seletividade em redes de média tensão com
geração distribuída utilizando ferramentas
computacionais / Gilcélia do Amaral da Silveira
Silveira. - 2022.
55 f. : il.

Orientador: Ednardo Pereira da Rocha Rocha.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2022.

1. ANAFAS. 2. MATLAB. 3. Proteção. I. Rocha,
Ednardo Pereira da Rocha , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da Instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

GILCÉLIA DO AMARAL DA SILVEIRA

OTIMIZAÇÃO DE ELABORAÇÃO DE ESTUDO DE COORDENAÇÃO E
SELETIVIDADE EM REDES DE MÉDIA TENSÃO COM GERAÇÃO DISTRIBUIDA
UTILIZANDO FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Monografia submetida ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-árido como parte dos requisitos para obtenção do grau de Graduado em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Instalações Elétricas Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Ednardo Pereira da Rocha

MOSSORÓ

2022

GILCÉLIA DO AMARAL DA SILVEIRA

Otimização de elaboração de estudo de coordenação e seletividade em redes de média tensão
com geração distribuída utilizando ferramentas computacionais

Esta monografia foi julgada adequada para a
obtenção do grau de Graduação em Engenharia
Elétrica e aprovada em sua forma final pelo
Orientador e pela Banca Examinadora.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ednardo Pereira da Rocha (Orientador)
Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA)

Prof. Dr. Humberto Dionisio de Andrade
Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA)

Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura
Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA)

Ao meu cachorro Jack e minha gata Lilo.

A meu companheiro Otávio e meus pais, Aridene e Oseas, meu irmão Gideon, minha cunhada Géssica, meus sobrinhos Kalebe e Gael.

A minha professora do primário Marineide, por acreditar que minha alfabetização fosse possível, embora os outros me considerassem inapta para o aprendizado, e todos os meus amigos que de alguma forma fizeram parte dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar aos meus pets, que me deram ânimo, força, saúde e autorregulação para atravessar esse caminho e transpor barreiras extremamente difíceis que, sem eles, seria impossível.

Ao meu grande companheiro Otávio Viana que, apesar da distância, sempre reservou muito do seu tempo, às vezes abdicando de si mesmo pra me ensinar, não apenas conteúdo, mas também a acreditar em mim mesma, à minha mãe, Aridene Costa, com sua forma de me fazer descontraír fora do ar acadêmico, e ao meu pai, Oseas Gomes, que me apoiaram tão fortemente sem me pressionar em nenhum momento, apoio inclusive a retirar-me e trancar o curso todas as vezes que foram necessárias, pra tratamento clínico como psicológico, nunca esquecerei pai dos seu olhos brilhantes dizendo “Minha filha não force a barra, não nade contra a maré”. Tudo isso tornou minha sanidade mental viável, para chegar até aqui e realizar esse trabalho.

Ao corpo docente da Universidade Federal Rural do Semi-árido, em especial ao Professor Dr. Idalmir de Souza Queiroz Junior, Dr. Adriano Aron Freitas de Moura, Dr. Humberto Dionisio de Andrade os quais transmitiam tanto amor ao entregar conhecimento em suas aulas acolhedoras e divertidas e em especial ao Professor Dr. Ednardo Pereira da Rocha, pelo qual tenho grande admiração e que se dispôs a me orientar e auxiliar na elaboração desta monografia.

À Bravus soluções em engenharia, que me deu a oportunidade de estagiar em áreas magníficas da empresa, na elaboração de projetos; experiência com qual foi possível a elaboração deste trabalho. Em especial, um agradecimento ao Eng. Otávio Viana que se dispôs a me auxiliar neste trabalho sem o qual seria inviável elaborá-lo.

Por fim, a todos os meus colegas e amigos que juntamente comigo atravessaram esses longos anos de formação acadêmica, em especial a Ana Karoline Oliveira (Karol) e a Ákilla que tornaram a estada em Mossoró mais leve, a Raília Batista e ao Pedro Lucas que por diversas vezes fizeram parceira comigo nos trabalhos da Universidade e com os quais muito aprendi; no mais, tenho certeza que ao longo de todo esse tempo foi construída, com todos com os quais tive contato, uma grande troca que se perpetuará para o mercado de trabalho.

“Seja sempre inquieto e vez por outra paciente, parece contraditório soa meio diferente, mas as vezes pisar no freio também é andar pra frente.” (Bráulio Bessa)

“Eu não falhei. Apenas descobri 10 mil maneiras que não funcionam.” (Thomas Edison)

RESUMO

Nas últimas décadas o consumo de energia vem se tornando cada vez maior, segundo EPE (Empresa de Pesquisa Energética) no Brasil o consumo de energia elétrica expandiu 3,0% quando comparado com mesmo mês de 2021. O consumo cativo de eletricidade é historicamente maior que o consumo livre. Porém, nos últimos anos este tipo de comercialização está perdendo espaço [1]. O aumento no consumo reflete diretamente na demanda necessária para o abastecimento do mercado energético do país, e isso juntamente com outros fatores como a seca contribuem para elevar os preços nas tarifas, e é por conta desse aumento que se vê necessário a instalação de geração própria nos sistemas energéticos industriais. Assim, com uma crescente demanda de projetos de geração de energia, e a dificuldade em desenvolver esse tipo de estudo de coordenação e seletividade nas empresas de engenharia é que este trabalho se propõe a apresentar uma metodologia, voltada para projetistas, visando a otimização do processo de agilizar o desenvolvimento de projetos com o uso dos softwares ANAFAS e MATLAB e consequentemente aumentar a produção de projetos possibilitando atendimento das eventuais grandes demandas. A fim de validar a proposta é feito um estudo de caso que se estende por três etapas bem definidas: a elaboração de um projeto da forma como é feito hoje, com o uso ferramentas computacionais e a avaliação das duas metodologias, com e sem o uso de ferramentas computacionais. Os resultados são extremamente favoráveis ao uso de ferramentas computacionais (software ANAFAS, MATLAB, etc), quando da comparação, os erros encontrados para os níveis de falta nas barras do sistema são desprezíveis; o ganho de velocidade no tempo na elaboração do projeto com a utilização de ferramentas computacionais chega a 176%, ou seja, utilizando ferramentas computacionais, o tempo gasto com a elaboração do estudo foi quase um terço do tempo gasto quando comparada com o método manual. Assim, é fácil ver como a metodologia utilizando ferramentas computacionais tais como o ANAFAS é significativamente mais eficiente que a metodologia tradicional, além de garantir planejamento futuro da expansão do sistema, visto que é possível simular diversos cenários diferentes. Dessa forma, pode ser notado que tecnicamente o uso dos softwares ANAFAS e MATLAB é completamente viável e sem dúvida traria maior agilidade e eficiência no processo de elaboração e redução de erros.

Palavras-Chave: ANAFAS e MATLAB, Proteção.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Evolução do número de consumidores livres - EPE - Últimos 9 Anos	17
Figura 2.1-Esquema Unifilar Elétrico Simplificado do Sistema Industrial.....	21
Figura 3.1 – Equivalente de Sequências para Falta 3 ϕ em B-01 (Cond. Operação I).....	27
Figura 3.2 – Equivalente de Sequências para Falta 1 ϕ em B-00 (Cond. Operação I).....	28
Figura 3.3 – Equivalente de Sequências para Falta 3 ϕ em B-01 (Cond. Operação II).....	29
Figura 3.4 – Equivalente de Sequências para Falta 1 ϕ em B-01 (Cond. Operação II).....	31
Figura 3.5 – Coordenograma de Fase - Manual	34
Figura 3.6 – Coordenograma de Neutro - Manual.....	35
Figura 4.1 – Sistema Industrial do Estudo de Caso Montado no ANAFAS	36
Figura 4.2 – Tela Parâmetros Equivalente de Rede da Concessionária	37
Figura 4.3 – Tela Parâmetros dos Cabos da Rede de Distribuição	37
Figura 4.4 – Tela Parâmetros dos Transformadores TR-1/2/3	38
Figura 4.5 – Tela Parâmetros dos Geradores GG-01/02	38
Figura 4.6 – Curto-Circuito 3 ϕ (Cond. Operação I) - ANAFAS.....	39
Figura 4.7 – Curto-Circuito 2 ϕ (Cond. Operação I) - ANAFAS.....	39
Figura 4.8 – Curto-Circuito 1 ϕ (Cond. Operação I) - ANAFAS.....	39
Figura 4.9 – Curto-Circuito 3 ϕ (Cond. Operação II) - ANAFAS	40
Figura 4.10 – Curto-Circuito 2 ϕ (Cond. Operação II) - ANAFAS	41
Figura 4.11 – Curto-Circuito 1 ϕ (Cond. Operação II) - ANAFAS	41
Figura 4. 12 – Coordenograma de Fase – Script Matlab – Apêndice A.....	42
Figura 4. 13 – Coordenograma de Neutro - Script Matlab – Apêndice A.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-Impedância Reduzida-Barra de Saída da SE CONCESSIONÁRIA (B-00)	21
Tabela 2.2- Topologia e Parâmetros da Rede de MT	22
Tabela 2.3-Ordem de Ajuste da Proteção do Relé CONCESSIONÁRIA (RS-1).....	22
Tabela 2.4-Dados Básicos do Transformador da SE CLIENTE	22
Tabela 2.5-Dados Básicos do Gerador do Cliente.....	22
Tabela 2.6-Nomenclatura das Barras do Sistema Estudado	23
Tabela 2.7-Ordem de Ajuste da Proteção do Relé de Proteção Geral SE CLIENTE (RS-2)...	23
Tabela 2.8-Ordem de Ajuste da Proteção do Relé de Proteção dos Transformadores TR-1/2/3(500kVA) (RS-3/4/5)	23
Tabela 3.1 – Resumo dos Níveis de Falta – Condição de Operação I - Manual	28
Tabela 3.2 – Resumo dos Níveis de Falta – Condição de Operação II - Manual.....	33
Tabela 4.1 – Resumo Níveis de Falta – Cond. Operação I - ANAFAS	40
Tabela 4.2 – Resumo Níveis de Falta – Cond. Operação II - ANAFAS	41
Tabela 5.1 – Comparação Manual/ANAFAS - Níveis de Falta – Cond. Operação I.....	45
Tabela 5.2 – Comparação Manual/ANAFAS - Níveis de Falta 3 ϕ – Cond. Operação II	45
Tabela 5.3 – Comparação Manual/ANAFAS - Níveis de Falta 2 ϕ – Cond. Operação II	45
Tabela 5.4 – Comparação Manual/ANAFAS - Níveis de Falta 1 ϕ - Cond. Operação II	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DT	Decisão Técnica – Documento da Companhia Energética do Ceará
IEC	International Electrotechnical Commission
OAP	Ordem de Ajuste da Proteção
SE	Subestação de Energia Elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

S_b	Potência de Base Adotada
V_b	Tensão de Base Adotada
RT	Tensão de Base no Nível da Média Tensão (13,8 kV)
$Z_{b(MT)}$	Tensão de Base no Nível da Baixa Tensão (0,38 kV)
$Z_{b(BT)}$	Relação de Transformação do Transformador da SE CLIENTE
$I_{b(MT)}$	Impedância de Base no Nível da Média Tensão (13,8 kV)
$I_{b(BT)}$	Corrente de Base no Nível da Média Tensão (13,8 kV)
Z_{uS}	Impedância de Sequência Positiva Reduzida na Barra B-00
Z_{u0S}	Impedância de Sequência Zero Reduzida na Barra B-00
Z_{uMT1}	Impedância de Sequência Positiva Correspondente ao Circuito do Trecho 1
d	Comprimento do Trecho
$Z_{l(\Omega/km)}$	Impedância de Seq. Positiva do Condutor que Compõe o Trecho (Ω/km)
Z_{u0MT1}	Impedância de Sequência Zero Correspondente ao Circuito do Trecho 1
$Z_{0(\Omega/km)}$	Impedância de Seq. Zero do Condutor que Compõe o Trecho (Ω/km)
Z_{uMT2}	Impedância de Sequência Positiva Correspondente ao Circuito do Trecho 2
Z_{u0MT2}	Impedância de Sequência Zero Correspondente ao Circuito do Trecho 2
Z_{uTR1}	Impedância de Sequência Positiva do Transformador da SE CLIENTE
X_t	Reatância Percentual do Transformador da SE CLIENTE
$V_{t(PRIM)}$	Tensão Nominal Primária do Transformador da SE CLIENTE
S_t	Potência Aparente Nominal do Transformador da SE CLIENTE
Z_{u0TR1}	Impedância de Sequência Zero do Transformador da SE CLIENTE
$Z_{uGG01/02}$	Impedância de Sequência Positiva do Gerador do Cliente
X''_d	Reatância Subtransitória de Eixo Direto do Gerador do Cliente
$V_{GG01/02}$	Tensão Nominal do Gerador do Cliente
$Z_{u0GG01/02}$	Impedância de Sequência Zero do Gerador do Cliente
X_0	Reatância de Sequência Zero do Gerador do Cliente
S_g	Potência Aparente Nominal do Gerador do Cliente
$Z_{u(B-01)}$	Impedância Equivalente de Sequência Positiva Vista da Barra B-01
$I_{cc3\phi(B-01)}$	Corrente de Curto-Circuito Trifásico na Barra B-01
$I_{cc2\phi(B-01)}$	Corrente de Curto-Circuito Bifásico na Barra B-01
$Z_{u0(B-01)}$	Impedância Equivalente de Sequência Zero Vista da Barra B-01

$I_{cc1\phi(B-01)}$	Corrente de Curto-Circuito Monofásico na Barra B-01
$Z_{u(B-01)-M}$	Impedância Equivalente de Sequência Positiva a Montante da Barra B-01
$Z_{u(B-01)-J}$	Impedância Equivalente de Sequência Positiva a Jusante da Barra B-01
$I_{cc3\phi(B-01)/CONC.}$	Contribuição da Fonte CONCESSIONARIA Falta Trifásica na Barra B-01
$I_{cc3\phi(B-01)/CLIENTE}$	Contribuição da Fonte CLIENTE para a Falta Trifásica na Barra B-01
$I_{cc2\phi(B-01)/CONC.}$	Contribuição da Fonte CONCESSIONARIA Falta Bifásica na Barra B-01
$I_{cc2\phi(B-01)/CLIENTE}$	Contribuição da Fonte CLIENTE para a Falta Bifásica na Barra B-01
$Z_{u0(B-01)-M}$	Impedância Equivalente de Sequência Zero a Montante da Barra B-01
$Z_{u0(B-01)-J}$	Impedância Equivalente de Sequência Zero a Jusante da Barra B-01
$I_{cc1\phi(B-01)/CONC.}$	Contribuição da Fonte CONCESSIONARIA Falta Monofásica na Barra B-01
$I_{cc1\phi(B-01)/CLIENTE}$	Contribuição da Fonte CLIENTE para a Falta Monofásica na Barra B-01
$E\%$	Erro Relativo Percentual
X	Valor Real da Grandeza
X'	Valor Medido da Grandeza
t_{manual}	Tempo Total de Análise pelo Método Manual
t_{EFerr_Comp}	Tempo Total com Ferramentas Computacionais (ANAFAS/MATLAB)
G_v	Tempo Total de Elaboração pelo Método Manual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Aumento de Geração Particular no Sistema Energético	16
1.2	Justificativa do Tema Selecionado.....	17
1.3	Objetivo do Trabalho.....	18
1.4	Composição do Trabalho.....	18
2	O PROJETO DE GERAÇÃO EM RAMPA E SUA METODOLOGIA ATUAL DE ANÁLISE	20
2.1	Descrição Geral Básica	20
2.2	Dados Fornecidos pela Concessionária	21
2.3	Dados Próprios do Sistema Industrial	22
3	ESTUDO DE CASO EMPREGANDO A ATUAL METODOLOGIA DE ANÁLISE	24
3.1	Cálculo dos Níveis de Curto-Circuito.....	24
3.1.1	<i>Níveis de Curto-Circuito Condição de Operação I.....</i>	26
3.1.1.1	Níveis de Curto-Circuito na Barra B-01	26
3.1.1.1.1	<i>Cálculo do Curto-Circuito Trifásico e Bifásico</i>	<i>26</i>
3.1.1.1.2	<i>Cálculo do Curto-Circuito Monofásico</i>	<i>27</i>
3.1.1.2	Resumo dos Níveis de Curto-Circuito para o Condição de Operação I.....	28
3.1.2	<i>Níveis de Curto-Circuito Condição de Operação II</i>	28
3.1.2.1	Níveis de Curto-Circuito na Barra B-01	29
3.1.2.1.1	<i>Cálculo do Curto-Circuito Trifásico e Bifásico</i>	<i>29</i>
3.1.2.1.2	<i>Cálculo do Curto-Circuito Monofásico</i>	<i>31</i>
3.1.2.2	Resumo dos Níveis de Curto-Circuito para a Condição de Operação II.....	33
3.2	Estudo da Proteção do Sistema.....	33
3.2.1	<i>Coordenogramas</i>	33
3.2.1.1	Coordenograma de Fase	34
3.2.1.2	Coordenograma de Neutro	35
4	ESTUDO DE CASO EMPREGANDO A METODOLGIA COMPUTACIONAL	36
4.1	ANAFAS – Software para otimização dos Cálculos de Níveis de Curto-Circuito	36

4.2	A Planta Industrial do Estudo de Caso Montada no ANAFAS.....	36
4.3	Determinação dos Níveis de Curto-Circuito.....	39
4.3.1	<i>Cálculo do Níveis de Curto-Circuito para Condição de Operação I.....</i>	<i>39</i>
4.3.2	<i>Cálculo do Níveis de Curto-Circuito para Condição de Operação II.....</i>	<i>40</i>
4.4	Estudo da Proteção do Sistema.....	41
4.4.1	<i>Coordenogramas</i>	<i>42</i>
5	CONFRONTAÇÃO DAS METODOLOGIAS	44
5.1	Considerações Gerais.....	44
5.2	Comparação #1 – Níveis de Falta nas Barras do Sistema	45
5.3	Comparação #2 – Coordenogramas	46
5.4	Comparação #3 – Tempo de Elaboração do Estudo de Coordenação e Seletividade	46
6	CONCLUSÃO	48
7	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – O SISTEMA INDUSTRIAL UTILIZADO NO ESTUDO DE CASO.....	52

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar o assunto que será tratado logo mais nesta monografia. Num primeiro momento será apresentado um breve histórico e em seguida, será apresentada a justificativa da escolha do tema, e o objetivo a ser alcançado através da concepção deste trabalho. Observando a crescente demanda de projetos de geração particular em energia elétrica nas últimas décadas e a dificuldade e complexidade na elaboração desse tipo de projeto é que este trabalho se propõe a apresentar uma metodologia que agilize o processo de concepção e desenvolvimento do projeto com o uso de ferramentas computacionais (software ANAFAS, MATLAB, etc). A fim de validar a proposta é feito um estudo de caso que se estende por três etapas bem definidas: a elaboração de um projeto da forma como é feito hoje, com o uso ferramentas computacionais e a avaliação das duas metodologias, com e sem o uso de ferramentas computacionais. Os resultados são extremamente favoráveis ao uso do ferramentas computacionais (software ANAFAS, MATLAB, etc), quando da comparação, os erros encontrados para os níveis de falta nas barras do sistema são desprezíveis; o ganho de velocidade no tempo na elaboração do projeto com a utilização de ferramentas computacionais chega a 176%, ou seja, utilizando ferramentas computacionais , o tempo gasto com a elaboração do estudo foi quase um terço do tempo gasto quando comparada com o método manual. Assim, é fácil ver como a metodologia utilizando ferramentas computacionais tais como o ANAFAS é significativamente mais eficiente que a metodologia tradicional, além de garantir o planejamento futuro da expansão do sistema, visto que é possível simular diversos cenários diferentes.

1.1 Aumento de Geração Particular no Sistema Energético

Nas últimas décadas o consumo de energia vem se tornando cada vez maior, segundo EPE (Empresa de Pesquisa Energética) no Brasil o consumo de energia elétrica expandiu 3,0% quando comparado com o mesmo mês de 2021. O consumo cativo de eletricidade é historicamente maior que o consumo livre. Porém, nos últimos anos este tipo de comercialização está perdendo espaço [1]. O aumento no consumo se reflete diretamente na demanda necessária para o abastecimento do mercado energético do país, e isso juntamente com outros fatores como a seca contribuem para elevar os preços nas tarifas, e é por conta desse

aumento que se vê necessário a instalação de geração própria nos sistemas energéticos industriais.

Figura 1.1 – Evolução do número de consumidores livres - EPE - Últimos 9 Anos



Fonte: EPE 2022. Dados fornecidos por [1].

1.2 Justificativa do Tema Selecionado

O cliente que deseja possuir uma geração de energia particular e conectar-se à rede pública de eletricidade precisa elaborar um projeto elétrico e submetê-lo à concessionária para que ela o analise. Se o sistema de geração de energia for funcionar em paralelo com a rede pública de eletricidade, o projeto a ser elaborado pelo cliente, quando comparado a um projeto de geração com interrupção na transferência de carga, é bem mais complexo e demanda maior atenção e cuidados em virtude dos maiores riscos contidos numa instalação com esse tipo de geração.

Outro ponto é a crescente demanda, nos últimos anos, de projetos de geração própria submetidos à concessionária. Vê-se claramente que, a cada ano, a quantidade de clientes que deseja possuir uma geração particular cresce de forma bastante significativa.

Um detalhe fundamental para caracterizar o estudo a ser realizado nesta monografia é que, hoje, o tipo de cliente que está apto a possuir uma geração particular que funcionará em paralelo com a rede pública de eletricidade, de acordo com as normas e a legislação em vigor, é aquele atendido em tensão primária de distribuição, ou seja, aquele cliente que possui uma subestação abaixadora de tensão própria. Assim sendo, a elaboração do projeto de geração

particular vai muito além do escopo de um projeto de geração em si, ele deve levar em consideração esse item fundamental na instalação do cliente que é a subestação.

Tendo em vista toda essa demanda de projetos e as exigências de velocidade de elaboração cada vez maiores, tanto por partes dos clientes que submetem os projetos à concessionária, quanto dos órgãos reguladores que atuam sobre as concessionárias, e até mesmo por parte da própria concessionária que deseja elevar seus índices de desempenho, é que este trabalho sugere uma alternativa diferenciada de elaboração desse tipo de projeto.

1.3 Objetivo do Trabalho

Apresentar uma forma otimizada de elaboração de estudo de coordenação e seletividade em tensão primária de distribuição com base nos critérios estabelecidos na concessionária de energia elétrica local através do uso do software ANAFAS para os cálculos de níveis de curto-circuito e de um Script no MATLAB para elaboração dos Coordenogramas de seletividade.

1.4 Composição do Trabalho

Esta monografia está estruturada em seis capítulos e um apêndice. Neste capítulo, como foi observado, é feita uma explanação geral sobre os princípios históricos do porquê de, ao longo das últimas décadas, a demanda por usinas própria de geração de energia elétrica aumentou consideravelmente para, logo em seguida, serem apresentadas as justificativas da escolha do tema, e o objetivo a ser alcançado através da concepção deste trabalho. Por fim, são mostrados o objetivo da monografia e sua estrutura organizacional.

No Capítulo 2, é apresentada as principais características do sistema industrial que é utilizada nos capítulos 3 e 4 desta monografia como estudo de caso. Inicialmente é feita uma descrição geral da planta industrial, com a apresentação de um esquema unifilar simplificado, seguida da apresentação dos dados de responsabilidade da concessionária e dos dados próprios do sistema industrial.

Os capítulos 3, 4 e 5 fazem um estudo de caso do sistema industrial apresentado no capítulo 2 para validar a proposta de otimização objeto dessa monografia. O Capítulo 3 faz a elaboração de um estudo de coordenação e de seletividade de um projeto da forma como é feito hoje, de forma manual, é um capítulo deveras extenso e detalhado, mas que engloba os mais importantes e complexos itens abordados e analisados pela concessionária local. O Capítulo 4 traz a elaboração do mesmo estudo de coordenação e seletividade lançado no Capítulo 4, no

entanto com o uso de ferramentas computacionais (através do uso do software ANAFAS para os cálculos de níveis de curto-circuito e um *Script* no MATLAB para elaboração dos Coordenogramas de seletividade). Por fim, no Capítulo 5, é feita uma avaliação quantitativa e qualitativa das metodologias empregadas nos dois capítulos anteriores.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho, bem como recapitula os resultados obtidos.

O encerramento da monografia se dá no Capítulo 7 com o detalhamento das referências bibliográficas utilizadas no decorrer do trabalho.

O Apêndice A, o único apêndice desta monografia, apresenta uma descrição detalhada do Script desenvolvido no MATLAB para elaboração dos Coordenogramas de seletividade.

CAPÍTULO 2

O SISTEMA INDUSTRIAL UTILIZADO NO ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem por objetivo apresentar as principais características do sistema industrial utilizado nos capítulos 3 e 4 desta monografia como estudo de caso. Inicialmente é feita uma descrição geral da planta industrial, com a apresentação de um esquema unifilar simplificado, para em seguida apresentar os dados de responsabilidade da concessionária e os dados próprios do sistema industrial.

2.1 Descrição Geral Básica

A planta industrial tomada como referência para os estudos realizados nesta monografia é composta por uma subestação abrigada, com capacidade total instalada para 1.500 kVA, composta por 03 (três) Transformadores Abaixadores de Tensão à Seco, Primário com fechamento em Delta, tensão nominal de 13.800V, Secundário com fechamento em estrela aterrado, tensão nominal 380V entre fases e 220V entre fase e neutro, Potência de 500kVA, e que funcionará com sistema de Geração de Energia Elétrica, sem interrupção na Transferência de Cargas (Transferência em Rampa), com 02(dois) Grupo Motor-Gerador, sendo um com potência nominal 625kVA (500kW) em 380/220V e outro com potência de 375kVA (300kW) em 380/220V. A sala em que o gerador está instalado fica vizinha à subestação, sendo ambas fisicamente isoladas. Um esquema unifilar elétrico simplificado da planta industrial pode ser visto na Figura 2.1.

Os dados do circuito elétrico desde a subestação da concessionária que irá alimentar o empreendimento até o ponto de ligação (a definição de ponto de ligação pode ser visualizada em [2]) da unidade consumidora são entregues pela própria concessionária após uma solicitação por parte do projetista. Outro dado importante que também é entregue pela concessionária é a Ordem de Ajuste da Proteção (OAP), nela é possível obter os ajustes do religador que protege o alimentador que serve à planta industrial; isso é necessário para a elaboração do estudo de proteção.

No sistema aqui estudado, o ramal de ligação possui um comprimento desprezível para os efeitos de cálculos de curto-circuito e, assim sendo, o ponto de entrega da unidade consumidora é o próprio ponto de ligação. As definições de ramal de ligação e ponto de entrega também podem ser vistas em [2].

Tabela 2.2- Topologia e Parâmetros da Rede de MT

ID	CONDUTOR	EXTENSÃO (km)	IMPEDÂNCIA (Ω/km)			
			SEQUÊNCIA POSITIVA		SEQUÊNCIA ZERO	
			R_1	X_1	R_0	X_0
ZMT1	Cobre 95mm ²	2,70	0,2231	0,4040	0,3991	1,9282
ZMT2	Cobre 25mm ²	0,40	0,5991	0,4480	0,7769	1,9721

Fonte: Tabela própria. Dados obtidos a partir de [3].

Tabela 2.3-Ordem de Ajuste da Proteção do Relé CONCESSIONÁRIA (RS-1)

Tensão (kV)	Relação TC (RTC)	Corrente de Pickup(A)	Relé	Código ANSI	Ajuste da Proteção				Tipo de Temporização
					Proteção	Graduação			
						TAPE (A)	Curva (s)	Inst. (A)	
13,8	600/5	360	Alstom P142	50/51	Fase	3,00	0,20	4500A	M.I IEC
13,8	600/5	24	Alstom P142	50/51N	Neutro	0,20	0,65	2000A	M.I IEC

Fonte: Tabela própria. Dados obtidos a partir de [3].

Para o relé Alstom P142, o múltiplo mínimo de atuação é 1,1 e o máximo (saturação) é 20 [3].

2.3 Dados Próprios do Sistema Industrial

Seguem algumas tabelas que contêm determinados dados da planta industrial de suma importância para a elaboração/análise do projeto de geração:

Tabela 2.4-Dados Básicos do Transformador da SE CLIENTE

ID	ESPECIFICAÇÃO				
	kVA	PRIM kV	SEC kV	Z%	CONEXÃO
TR-01/02/03	500	13,8	0,38	5,50	Dyn1

Fonte: Tabela própria. Dados obtidos a partir de [4].

Tabela 2.5-Dados Básicos do Gerador do Cliente

ID	ESPECIFICAÇÃO								
	OPERACIONAL			FOLHA DE DADOS					
	kVA	kV	Hz	kVA	kV	Hz	X''d%	X2%	X0%
GG-01	625	0,38	60	625	0,38	60	13,00	25,00	8,00
GG-02	375	0,38	60	375	0,38	60	14,00	26,00	10,00

Fonte: Tabela própria. Dados obtidos a partir de [5] e [6].

Tabela 2.6-Nomenclatura das Barras do Sistema Estudado

Barra	Denominação
B-00	Barra de Saída da SE CONCESSIONARIA
B-01	Barra do Ponto de Entrega do Cliente
B-02	Barra de Sincronismo/Transferência GG-01 (QGBT-01)
B-03	Barra de Sincronismo/Transferência GG-02 (QGBT-02)

Fonte: Tabela própria.

Tabela 2.7-Ordem de Ajuste da Proteção do Relé de Proteção Geral SE CLIENTE (RS-2)

Tensão (kV)	Relação TC (RTC)	Corrente de Pickup(A)	Relé	Código ANSI	Ajuste da Proteção			Tipo de Temporização
					Proteção	Graduação		
						Dial Tempo (s)	Inst. (A)	
13,8	200/5	75	Easergy P3U30	50/51	Fase	0,20	900A	M.I IEC
13,8	200/5	15	Easergy P3U30	50/51N	Neutro	0,20	120A	M.I IEC

Fonte: Tabela própria. Dados obtidos a partir de [2], [7] e [8].

Tabela 2.8-Ordem de Ajuste da Proteção do Relé de Proteção dos Transformadores TR-1/2/3(500kVA) (RS-3/4/5)

Tensão (kV)	Relação TC (RTC)	Corrente de Pickup(A)	Relé	Código ANSI	Ajuste da Proteção			Tipo de Temporização
					Proteção	Graduação		
						Curva (s)	Inst. (A)	
13,8	200/5	25	Easergy P3U30	50/51	Fase	0,20	450A	M.I IEC
13,8	200/5	6	Easergy P3U30	50/51N	Neutro	0,20	60A	M.I IEC

Fonte: Tabela própria. Dados obtidos a partir de [2], [7] e [8].

Para o relé Schneider Easergy P3U30, o múltiplo mínimo de atuação é 1,1 e o máximo (saturação) é 20 [7].

CAPÍTULO 3

ESTUDO DE CASO COM A METODOLOGIA ATUAL DE ELABORAÇÃO DE ESTUDO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

Esse capítulo é iniciado com os cálculos inerentes à determinação das correntes de curto-circuito (trifásico, bifásico, monofásico) nos principais pontos da planta industrial, e na sequência temos a elaboração e avaliação do sistema de proteção desta planta industrial, tudo isso de forma manual, assim como é a realizado hoje por grande parte dos especialistas em Proteção de Sistema Elétricos. O método adotado neste capítulo para a determinação das correntes de curto-circuito é o mesmo presente em [5].

3.1 Cálculo dos Níveis de Curto-Circuito

Antes de iniciar a determinação dos níveis de curto-circuito, faz-se necessário definir as condições de operação do sistema.

1) Condições de Operação

Os cálculos aqui efetuados levam em consideração dois cenários de operação bem definidas, os quais estão descritos abaixo:

- a) Condição de Operação I – CONCESSIONÁRIA funcionando sem a geração de energia do CLIENTE (sistema de Geração Desligado);
- b) Condição de Operação II – CONCESSIONÁRIA funcionando em paralelo com o sistema de geração de energia do CLIENTE (sistema de geração de energia Ligada).

2) Tensão de Referência para as Correntes Determinadas

As correntes de falta determinadas neste capítulo são apresentadas no nível de tensão da barra na qual ocorre a falta, por exemplo, se a barra em análise está na média tensão, a corrente de curto-circuito exibida nos cálculos está referida à tensão de 0,38 kV.

3) Potência de Base Adotada

$$S_b = 100 \text{ MVA} \tag{1}$$

4) Tensão de Base Adotada

$$V_{b(MT)} = V_b \Rightarrow \boxed{V_{b(MT)} = 13,8 \text{ kV}}$$

$$V_{b(BT)} = \frac{V_{b(MT)}}{RT} = \frac{13,8}{36,3158} \Rightarrow \boxed{V_{b(BT)} = 0,38 \text{ kV}} \quad (2)$$

5) Impedância de Base

$$Z_{b(MT)} = \frac{(V_{b(MT)})^2}{S_b} = \frac{(13,8 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10^6} \Rightarrow \boxed{Z_{b(MT)} = 1,9044 \Omega} \quad (3)$$

6) Corrente de Base

$$I_{b(MT)} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_{b(MT)}} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot (13,8 \cdot 10^3)} \Rightarrow \boxed{I_{b(MT)} = 4.183,6976 \text{ A}} \quad (4)$$

7) Impedância Reduzida na Barra de Saída da SE DA CONCESSIONÁRIA (B-00)

$$Z_{us} = 0,0090 + j0,6938 \text{ pu}$$

$$Z_{u0s} = 0,0000 + j0,6350 \text{ pu} \quad (5)$$

8) Impedância Correspondente ao Circuito do Trecho 1

$$Z_{uMT1} = \frac{d \cdot Z_{l(\Omega/km)}}{Z_{b(MT)}} = \frac{2,70 \cdot (0,2231 + j0,4040)}{1,9044} \Rightarrow \boxed{Z_{uMT1} = 0,3163 + j0,5728 \text{ pu}}$$

$$Z_{u0MT1} = \frac{d \cdot Z_{l0(\Omega/km)}}{Z_{b(MT)}} = \frac{2,70 \cdot (0,3991 + j1,9282)}{1,9044} \Rightarrow \boxed{Z_{u0MT1} = 0,5658 + j2,7337 \text{ pu}} \quad (6)$$

9) Impedância Correspondente ao Circuito do Trecho 2

$$Z_{uMT2} = \frac{d \cdot Z_{l(\Omega/km)}}{Z_{b(MT)}} = \frac{0,40 \cdot (0,8880 + j0,4605)}{1,9044} \Rightarrow \boxed{Z_{uMT2} = 0,1865 + j0,0967 \text{ pu}}$$

$$Z_{u0MT2} = \frac{d \cdot Z_{l0(\Omega/km)}}{Z_{b(MT)}} = \frac{0,40 \cdot (1,0658 + j1,9847)}{1,9044} \Rightarrow \boxed{Z_{u0MT2} = 0,2239 + j0,4169 \text{ pu}} \quad (7)$$

10) Impedância do Transformador da SE CLIENTE-TR1/2/3(500kVA)

$$Z_{uTR1} = jX_t \cdot \left(\frac{V_{t(PRIM)}}{V_{b(MT)}} \right)^2 \cdot \frac{S_b}{S_t} = j0,050 \cdot \left(\frac{13,8 \cdot 10^3}{13,8 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{500 \cdot 10^3} \Rightarrow \boxed{Z_{uTR1} = j11,00 \text{ pu}}$$

$$Z_{TR1} = Z_{uTR1} \Rightarrow \boxed{Z_{u0TR1} = j11,11 \text{ pu}} \quad (8)$$

11) Impedância do Gerador do Cliente-GG01(625kVA)

$$Z_{uGG01} = jX_d'' \cdot \left(\frac{V_{GG01}}{V_{b(BT)}} \right)^2 \cdot \frac{S_b}{S_g} = j0,13 \cdot \left(\frac{0,38 \cdot 10^3}{0,38 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{625 \cdot 10^3} \Rightarrow \boxed{Z_{uGG01} = j20,80 \text{ pu}}$$

$$Z_{u0GG01} = jX_0 \cdot \left(\frac{V_{GG01}}{V_{b(BT)}} \right)^2 \cdot \frac{S_b}{S_g} = j0,08 \cdot \left(\frac{0,38 \cdot 10^3}{0,38 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{625 \cdot 10^3} \Rightarrow \boxed{Z_{u0GG01} = j12,80 \text{ pu}}$$
(9)

12) Impedância do Gerador do Cliente-GG02(375kVA)

$$Z_{uGG02} = jX_d'' \cdot \left(\frac{V_{GG02}}{V_{b(BT)}} \right)^2 \cdot \frac{S_b}{S_g} = j0,14 \cdot \left(\frac{0,38 \cdot 10^3}{0,38 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{375 \cdot 10^3} \Rightarrow \boxed{Z_{uGG02} = j37,3333 \text{ pu}}$$

$$Z_{u0GG02} = jX_0 \cdot \left(\frac{V_{GG02}}{V_{b(BT)}} \right)^2 \cdot \frac{S_b}{S_g} = j0,10 \cdot \left(\frac{0,38 \cdot 10^3}{0,38 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{375 \cdot 10^3} \Rightarrow \boxed{Z_{u0GG02} = j26,6667 \text{ pu}}$$
(10)

3.1.1 Níveis de Curto-Circuito Condição de Operação I

Conforme definido no item 1) da seção anterior, a Condição de Operação I caracteriza-se por possuir a contribuição das correntes de curto-circuito apenas da CONCESSIONÁRIA; é a circunstância em que o gerador particular não provoca nenhuma influência sobre o sistema.

3.1.1.1 Níveis de Curto-Circuito na Barra B-01

Esta é a seção em que são calculadas as magnitudes das correntes de curto-circuito (trifásica, bifásica e monofásica) na barra B-01 (Barra do Ponto de Entrega/conexão do Cliente) para a Condição de Operação I.

3.1.1.1.1 Cálculo do Curto-Circuito Trifásico e Bifásico

A partir da Figura 3.1, que representa o circuito equivalente de seqüências para um curto-circuito trifásico na barra B-01, tem-se que:

1) Impedância Equivalente de Sequência Positiva

$$Z_{u(B-01)} = Z_{u(B-00)} + Z_{uMT1} + Z_{uMT2}$$

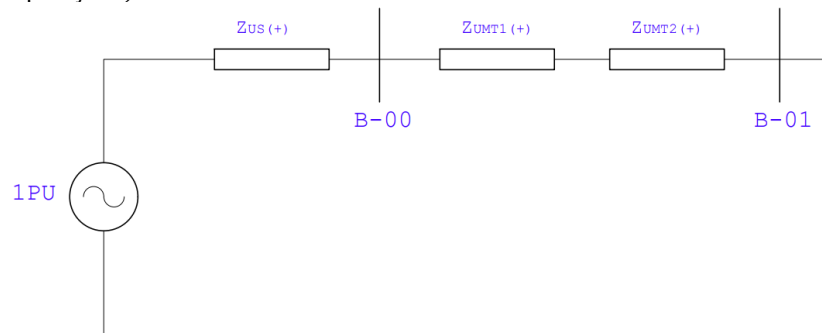
$$Z_{u(B-01)} = (0,0090 + j0,6938) + (0,3163 + j0,5728) + (0,1865 + j0,0967)$$
(11)

$$\boxed{Z_{u(B-01)} = 0,5118 + j1,3633 \text{ pu}}$$

2) Curto-Circuito Trifásico

$$I_{cc3\phi(B-01)} = \frac{I_{b(MT)}}{|Z_{u(B-01)}|} = \frac{4.183,6976}{|0,5118 + j1,3633|} \Rightarrow \boxed{I_{cc3\phi(B-01)} = 2,873 \text{ kA}} \quad (12)$$

Figura 3.1 – Equivalente de Sequências para Falta 3 ϕ em B-01 (Cond. Operação I)



Fonte: Ilustração própria.

3) Curto-Circuito Bifásico

$I_{cc2\phi(B-01)}$ Corrente de Curto-Circuito Bifásico na Barra B-01

$$I_{cc2\phi(B-01)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cc3\phi(B-01)} \Rightarrow \boxed{I_{cc2\phi(B-01)} = 2,488 \text{ kA}} \quad (13)$$

3.1.1.1.2 Cálculo do Curto-Circuito Monofásico

A partir da Figura 3.2, que representa o circuito equivalente de seqüências para um curto-circuito monofásico na barra B-01 (o sinal negativo ao lado da impedância indica que essa é uma impedância de seqüência negativa), para a planta industrial tomada como estudo de caso nesta monografia, todas as impedâncias de seqüência negativa serão consideradas numericamente iguais às correspondentes impedâncias de seqüência positiva. Segundo [5], essa consideração não traz nenhum prejuízo considerável aos cálculos. Assim, tem-se que:

1) Impedância Equivalente de Sequência Zero

$Z_{u0(B-01)}$ Impedância Equivalente de Sequência Zero Vista da Barra B-01

$$Z_{u0(B-01)} = Z_{u0(B-00)} + Z_{u0MT1} + Z_{u0MT2}$$

$$Z_{u0(B-01)} = (0,0000 + j0,6350) + (0,5658 + j2,7337) + (0,2239 + j0,4169) \quad (14)$$

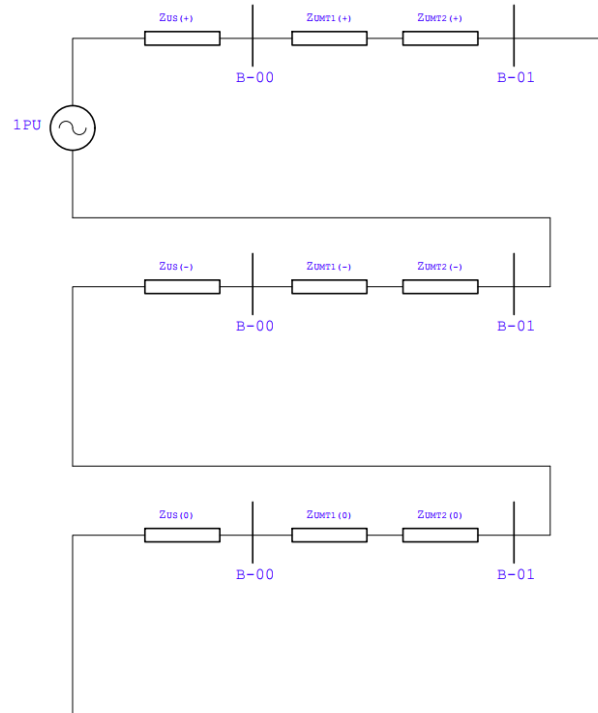
$$\boxed{Z_{u0(B-01)} = 0,7897 + j3,7856 \text{ pu}}$$

2) Curto-Circuito Monofásico

$$I_{cc1\phi(B-01)} = \frac{3 \cdot I_{b(MT)}}{\left| 2 \cdot Z_{u(B-01)} + Z_{u0(B-01)} \right|} = \frac{3 \cdot 4.183,6976}{\left| 2 \cdot (0,5118 + j1,3633) + (0,7897 + j3,7856) \right|} \quad (15)$$

$$I_{cc1\phi(B-01)} = 1,857 \text{ kA}$$

Figura 3.2 – Equivalente de Sequências para Falta 1φ em B-00 (Cond. Operação I)



Fonte: Ilustração própria.

3.1.1.2 Resumo dos Níveis de Curto-Circuito para o Condição de Operação I

Tabela 3.1 – Resumo dos Níveis de Falta – Condição de Operação I - Manual

Barra	Tipo de Falta		
	Trifásica (kA)	Bifásica (kA)	Monofásica(kA)
B-01-Barra do Ponto de Entrega do Cliente	2,873	2,488	1,857

Fonte: Tabela própria.

3.1.2 Níveis de Curto-Circuito Condição de Operação II

Conforme definido no item 1) da seção, a Condição de Operação II caracteriza-se por possuir a CONCESSIONÁRIA funcionando em paralelo com o sistema de geração de energia do CLIENTE. Nessa condição de operação ocorrem os maiores níveis de curto-circuito.

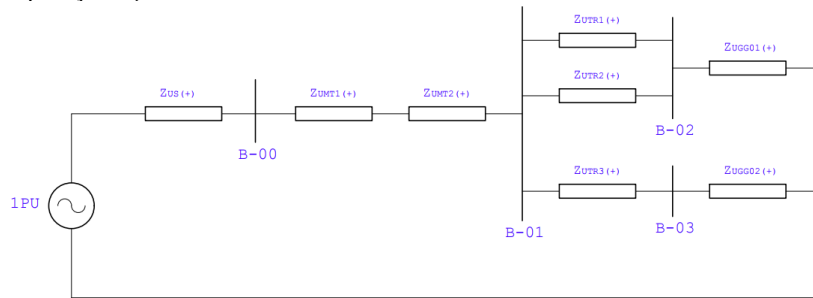
3.1.2.1 Níveis de Curto-Circuito na Barra B-01

Esta é a seção em que são calculadas as magnitudes das correntes de curto-circuito (trifásica, bifásica e monofásica) na barra B-01 (Barra do Ponto de Entrega do Cliente) para a Condição de Operação II, bem como as respectivas contribuições da CONCESSIONÁRIA e do sistema de geração de energia do CLIENTE.

3.1.2.1.1 Cálculo do Curto-Circuito Trifásico e Bifásico

A figura abaixo representa o circuito equivalente de seqüências para um curto-circuito trifásico na barra B-01:

Figura 3.3 – Equivalente de Sequências para Falta 3φ em B-01 (Cond. Operação II)



Fonte: Ilustração própria.

1) Impedância Equivalente de Sequência Positiva a Montante da Barra de Falta

$$Z_{u(B-01)-M} = Z_{us} + Z_{uMT1} + Z_{uMT2}$$

$$Z_{u(B-01)-M} = (0,0090 + j0,6938) + (0,3163 + j0,5728) + (0,1865 + j0,0967) \quad (16)$$

$$\underline{Z_{u(B-01)-M} = 0,5118 + j1,3633 \text{ pu}}$$

2) Impedância Equivalente de Sequência Positiva a Jusante da Barra de Falta

$$Z_{u(B-01)-J} = ((Z_{uTR1} // Z_{uTR2}) + Z_{uGG01}) // (Z_{uTR3} + Z_{uGG02})$$

$$Z_{u(B-01)-J} = ((j11,00 // j11,00) + j20,80) // (j11,00 + j37,3333)$$

$$\underline{Z_{u(B-01)-J} = j17,0322 \text{ pu}} \quad (17)$$

3) Impedância Equivalente de Sequência Positiva Vista da Barra de Falta

$$\begin{aligned} Z_{u(B-01)} &= Z_{u(B-01)-M} // Z_{u(B-01)-J} = (0,5118 + j1,3633) // (j17,0322) \\ Z_{u(B-01)} &= 0,4384 + j1,2745 \text{ pu} \end{aligned} \quad (18)$$

4) Curto-Circuito Trifásico

$$I_{cc3\phi(B-01)} = \frac{I_{b(MT)}}{|Z_{u(B-01)}|} = \frac{4.183,6976}{|0,4384 + j1,2745|} \Rightarrow I_{cc3\phi(B-01)} = 3,104 \text{ kA} \quad (19)$$

5) Contribuição da CONCESSIONÁRIA para a Falta

$$\begin{aligned} I_{cc3\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} &= \left| \frac{Z_{u(B-01)-J}}{Z_{u(B-01)-M} + Z_{u(B-01)-J}} \right| \cdot I_{cc3\phi(B-01)} \\ I_{cc3\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} &= \left| \frac{(j17,0322)}{(0,5118 + j1,3633) + (j17,0322)} \right| \cdot (3,104) \\ I_{cc3\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} &= 2,873 \text{ kA} \end{aligned} \quad (20)$$

6) Contribuição da Fonte CLIENTE para a Falta

$$\begin{aligned} I_{cc3\phi(B-01)/CLIENTE} &= \left| \frac{Z_{u(B-01)-M}}{Z_{u(B-01)-M} + Z_{u(B-01)-J}} \right| \cdot I_{cc3\phi(B-01)} \\ I_{cc3\phi(B-01)/CLIENTE} &= \left| \frac{(0,5118 + j1,3633)}{(0,5118 + j1,3633) + (j17,0322)} \right| \cdot (3,104) \\ I_{cc3\phi(B-01)/CLIENTE} &= 0,246 \text{ kA} \end{aligned} \quad (21)$$

4) Curto-Circuito Bifásico

$I_{cc2\phi(B-01)}$ Corrente de Curto-Circuito Bifásico na Barra B-01

$$I_{cc2\phi(B-01)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cc3\phi(B-01)} \Rightarrow I_{cc2\phi(B-01)} = 2,688 \text{ kA} \quad (22)$$

$I_{cc2\phi(B-01)/CONCESSIONARIA}$ Corrente de Curto-Circuito Bifásico na Barra B-01/Contribuição Concessionária

$$I_{cc2\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cc3\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} \Rightarrow I_{cc2\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} = 2,488 \text{ kA} \quad (23)$$

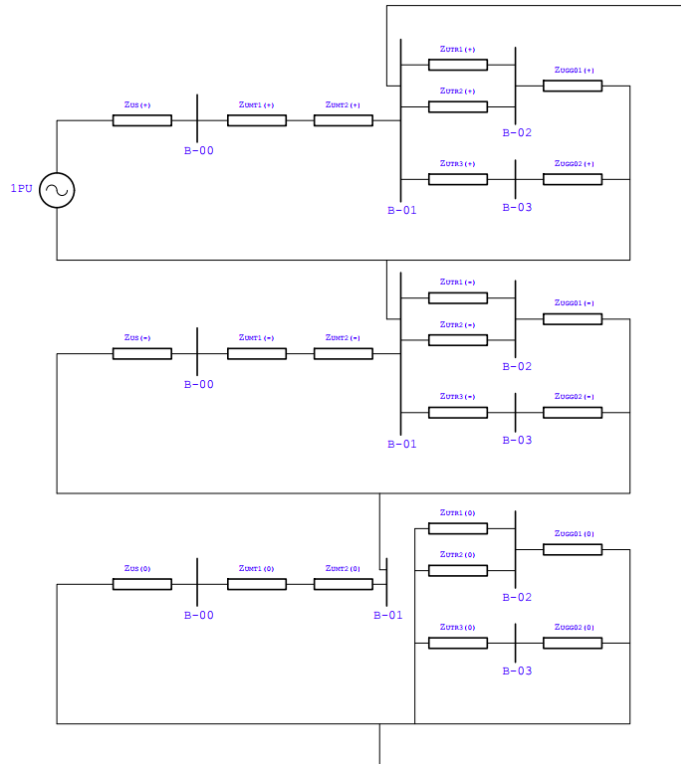
Corrente de Curto-Circuito Bifásico na Barra
B-01/Contribuição Usina de Geração de Energia Cliente

$$I_{cc2\phi(B-01)/CLIENTE} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cc3\phi(B-01)/CLIENTE} \Rightarrow \boxed{I_{cc2\phi(B-01)/CLIENTE} = 0,213 \text{ kA}} \quad (24)$$

3.1.2.1.2 Cálculo do Curto-Circuito Monofásico

A figura abaixo representa o circuito equivalente de seqüências para um curto-circuito monofásico na barra B-01. O sinal negativo ao lado da impedância indica que essa é uma impedância de seqüência negativa.

Figura 3.4 – Equivalente de Sequências para Falta 1φ em B-01 (Cond. Operação II)



Fonte: Ilustração própria.

1) Impedância Equivalente de Sequência Zero a Montante da Barra de Falta

$$Z_{u0(B-01)-M} = Z_{u0S} + Z_{u0MT1} + Z_{u0MT2}$$

$$Z_{u0(B-01)-M} = (0,0000 + j0,6350) + (0,5658 + j2,7337) + (0,2239 + j0,4169)$$

$$\boxed{Z_{u0(B-01)-M} = 0,7897 + j3,7856 \text{ pu}}$$

(25)

2) Curto-Circuito Monofásico

$$\begin{aligned}
 I_{a1-B01} &= I_{a2-B01} = I_{a0-B01} = \frac{I_{b1}}{2 \times Z_{UB01} + Z_{U0B01}} \\
 I_{a1-B01} &= I_{a2-B01} = I_{a0-B01} = \frac{4183,6976}{2 \times (0,4384 + j1,2745) + (0,7897 + j3,7856)} \\
 I_{a1-B01} &= I_{a2-B01} = I_{a0-B01} = 638,7184 \text{ A} \\
 I_{1\phi B01} &= I_{a1-B01} + I_{a2-B01} + I_{a0-B01} = 3 \times 638,7184 \text{ A} \\
 \boxed{I_{cc1\phi(B-01)} &= 1,916 \text{ kA}}
 \end{aligned} \tag{26}$$

3) Contribuição da Fonte CONCESSIONÁRIA para a Falta

De acordo com a equação matricial da teoria das componentes simétricas [5], temos que a contribuição da CONCESSIONÁRIA de curto-circuito fase-terra é igual: $I_{cc1\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} = I_{a0/CONC.} + I_{a1/CONC.} + I_{a2/CONC.}$.

Como a corrente de sequência positiva ($I_{a1/CONC.}$) e de sequência negativa ($I_{a2/CONC.}$) são iguais, temos:

$$\begin{aligned}
 I_{cc1\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} &= 2 \times I_{a1 \rightarrow CONCESSIONARIA} + I_{a0 \rightarrow CONCESSIONARIA} \\
 I_{cc1\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} &= 2 \times \left| \frac{Z_{u(B-01)-J}}{Z_{u(B-01)-M} + Z_{u(B-01)-J}} \right| \times I_{a1 \rightarrow CONCESSIONARIA} + I_{a0 \rightarrow CONCESSIONARIA} \\
 I_{cc1\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} &= 2 \times 0,9255 \times 638,7184 + 638,7184 \\
 \boxed{I_{cc1\phi(B-01)/CONCESSIONARIA} &= 1,821 \text{ kA}}
 \end{aligned} \tag{273}$$

4) Contribuição da Fonte CLIENTE para a Falta

Verificamos no circuito equivalente acima que não existe contribuição de corrente de sequência zero por parte CLIENTE já que o circuito está aberto. Dessa forma, a corrente de contribuição da CLIENTE curto-circuito fase-terra será devido as componentes de sequência positiva e sequência negativa. Assim temos que:

$$I_{cc1\phi(B-01)/CLIENTE} = I_{a0/CLIENTE} + I_{a1/CLIENTE} + I_{a2/CLIENTE}$$

Como a corrente de sequência positiva ($I_{a1/CLIENTE}$) e de sequência negativa ($I_{a2/CLIENTE}$) são iguais e a corrente de sequência zero é igual a $I_{a0/CLIENTE} = 0 \text{ A}$, temos:

$$I_{cc1\phi(B-01)/CLIENTE} = 2 \times I_{a1 \rightarrow CLIENTE}$$

$$I_{cc1\phi(B-01)/CLIENTE} = 2 \times \left| \frac{Z_{u(B-01)-M}}{Z_{u(B-01)-M} + Z_{u(B-01)-J}} \right| \times I_{a1 \rightarrow CLIENTE}$$

$$I_{cc1\phi(B-01)/CLIENTE} = 2 \times 0,0791 \times 638,7184$$

$$I_{cc1\phi(B-01)/CLIENTE} = 0,101 \text{ kA}$$

(28)

3.1.2.2 Resumo dos Níveis de Curto-Circuito para a Condição de Operação II

Segue abaixo a Tabela 3.2 com o resumo dos níveis de corrente de falta calculados nesta seção.

Tabela 3.2 – Resumo dos Níveis de Falta – Condição de Operação II - Manual

Barra	Tipo de Falta								
	Trifásica (kA)			Bifásica (kA)			Monofásica(kA)		
	Contribuição CONCESSIONÁRIA	Contribuição CLIENTE	Total	Contribuição CONCESSIONÁRIA	Contribuição CLIENTE	Total	Contribuição CONCESSIONÁRIA	Contribuição CLIENTE	Total
B-01-Barra do Ponto de Entrega do Cliente	2,873	0,246	3,104	2,488	0,213	2,688	1,821	0,101	1,916

Fonte: Tabela própria.

Como era de se esperar, pelo princípio da superposição, e comparando as tabelas que resumem os níveis de curto-circuito para cada condição de operação (Tabela 3.1 e Tabela 3.2), as correntes de curto-circuito para a Condição de Operação II superam as correntes de falta para a Condição de Operação I.

3.2 Estudo da Proteção do Sistema

Com a determinação dos níveis de curto-circuito, o próximo passo é a elaboração dos gráficos conhecidos como Coordenogramas. Esses gráficos se fazem necessários para avaliar a Coordenação e Seletividade das funções 50/51 (sobrecorrente temporizada de fase e sobrecorrente instantânea de fase) e 50N/51N (sobrecorrente temporizada de neutro e sobrecorrente instantânea de neutro) do Sistema de Proteção em Estudo.

A partir da Figura 2.1, presente no Capítulo 2 deste trabalho, verifica-se que o sistema em estudo possui cinco dispositivos de proteção bem definidos: Relé de Proteção do Alimentador da CONCESSIONÁRIA (RS-1), Relé de Proteção Geral de Entrada da SE CLIENTE (RS-2) e os Relés de Proteção dos Transformadores TR-1/2/3(500kVA)(RS-3/4/5).

3.2.1 Coordenogramas

O coordenograma é que um gráfico, em escala logarítmica, onde a grandeza *corrente elétrica* é representada no eixo das abscissas e a grandeza *tempo de atuação* é representada no eixo das ordenadas.

Para a planta industrial, caso em estudo nessa monografia, segue abaixo o que, no mínimo, cada coordenograma deve conter segundo [8] e [9]:

a) Coordenograma de fase:

- Curvas da unidade de fase temporizada (51) e instantânea (50) dos relés de proteção (Relé CONCESSIONÁRIA e Relé CLIENTE);
- Ponto representativo da corrente de magnetização (*Inrush*) do transformador da SE CLIENTE;
- Curva de Suportabilidade Térmica do Transformador (Curva ANSI) da SE CLIENTE;

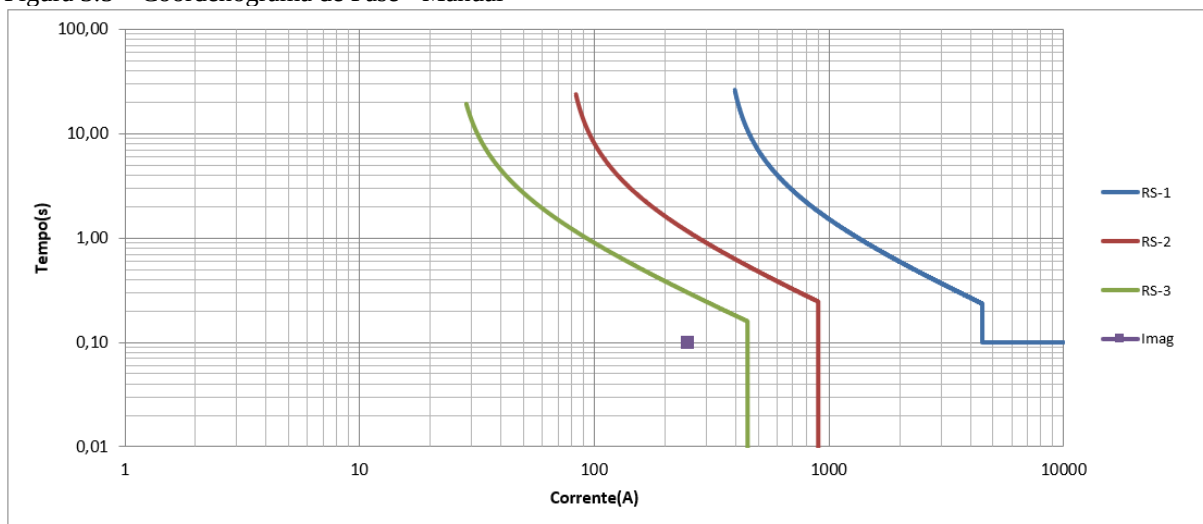
b) Coordenograma de neutro:

- Curvas da unidade de neutro temporizada (51N) e instantânea (50N) dos relés de proteção (Relé CONCESSIONÁRIA e Relé CLIENTE).

3.2.1.1 Coordenograma de Fase

Com o auxílio do aplicativo Microsoft Office Professional Plus Excel 2016, obteve-se o coordenograma de fase resultante do estudo da proteção da planta industrial utilizada com objeto de estudo dessa monografia. A Figura 3.5 apresenta o coordenograma gerado.

Figura 3.5 – Coordenograma de Fase - Manual



Fonte: Ilustração própria.

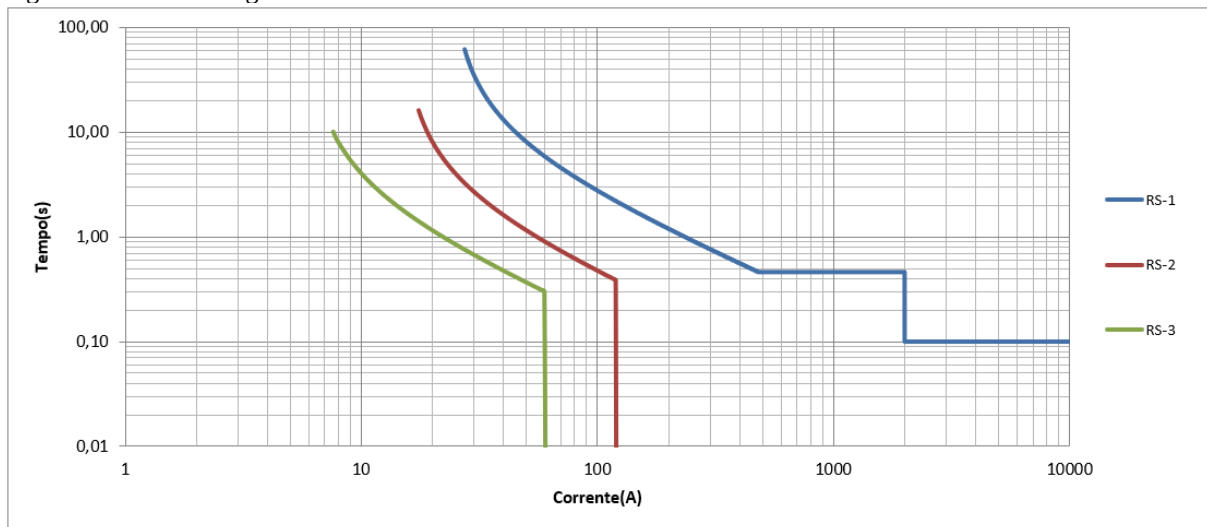
Através do Coordenograma apresentada na figura 3.5, é possível observar que o sistema de proteção se encontra adequadamente coordenado e seletivo para Falta Trifásicas e Bifásicas. Observa-se que a curva de atuação do relé proteção dos transformadores TR-

1/2/3(500kVA) (RS-3/4/5) está posicionada acima da corrente de magnetização, bem como está posicionada antes da curva de atuação do relé de proteção geral de entrada da SE CLIENTE (RS-2), que por sua vez está atuando antes do relé de proteção do alimentador da CONCESSIONÁRIA (RS-1).

3.2.1.2 Coordenograma de Neutro

Também com o auxílio do Microsoft Office Professional Plus Excel 2016, obteve-se o coordenograma de neutro resultante do estudo da proteção da planta industrial utilizada como objeto de estudo dessa monografia. A Figura 3.6, exibe o coordenograma gerado.

Figura 3.6 – Coordenograma de Neutro - Manual



Fonte: Ilustração própria.

Com base nas informações apresentadas na figura 3.6, é possível observar que o sistema de proteção se encontra adequadamente coordenado e seletivo para Falta Monofásicas. Verifica-se que a curva de atuação do relé proteção dos transformadores TR-1/2/3(500kVA) (RS-3/4/5) está posicionada antes da curva de atuação do relé de proteção geral de entrada da SE CLIENTE (RS-2), que por sua vez está atuando antes do relé de proteção do alimentador da CONCESSIONÁRIA (RS-1).

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO COM A METODOLOGIA COMPUTACIONAL

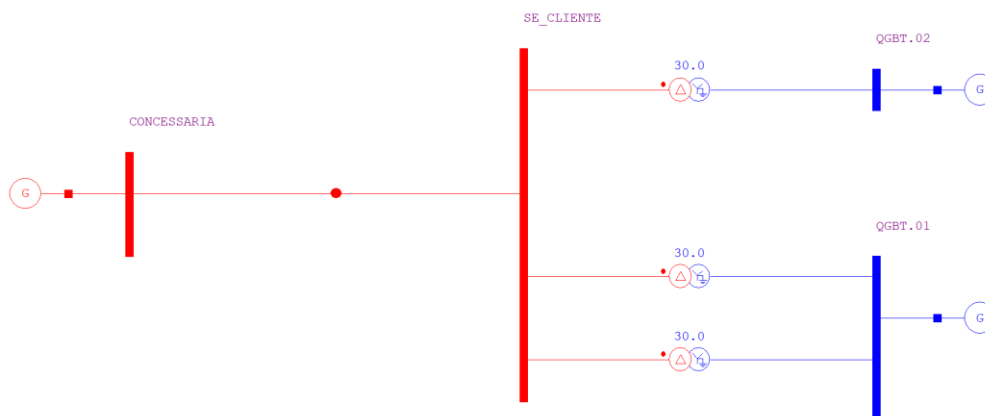
Esse capítulo apresenta uma forma otimizada de elaboração de estudo de coordenação e seletividade em tensão primária de distribuição através do uso do software ANAFAS para os cálculos de níveis de curto-circuito e um Script no MATLAB para elaboração dos Coordenogramas de seletividade.

4.1 ANAFAS – Software para otimização dos Cálculos de Níveis de Curto-Circuito

O software mais utilizado no Brasil para cálculo de níveis de curto-circuito é o ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas) produzido pelo CEPEL. O desenvolvimento deste software teve como a aumentar a qualidade e robustez do sistema para garantir a sua continuidade e melhorar o planejamento futuro da expansão do sistema, visto que é possível simular diversos cenários diferentes. Entre os seus usuários estão o ONS, a EPE, o MME, a Eletrobras, agentes de geração de energia, transmissão e distribuição, grandes consumidores industriais, produtores independentes e empresas de consultoria (CEPEL, 2018a).

4.2 A Planta Industrial do Estudo de Caso Montada no ANAFAS

Figura 4.1 – Sistema Industrial do Estudo de Caso Montado no ANAFAS



Fonte: Ilustração própria obtida com uso do software ANAFAS.

Com base nas características apresentadas no Capítulo dessa monografia e das ferramentas do ANAFAS, montou-se diagrama unifilar representativo da planta industrial do estudo de caso. O resultado é apresentado na Figura 4.1.

Os parâmetros configurados no ANAFAS do equivalente de rede da Concessionária (Figura 4.2), Cabos da Rede de Distribuição (Figura 4.3), Transformadores (Figura 4.4) e Geradores (Figura 4.5) são visualizadas dando-se um duplo clique com o botão esquerdo do mouse sobre o equipamento o qual se deseja visualizar.

Figura 4.2 – Tela Parâmetros Equivalente de Rede da Concessionária

The screenshot shows the 'Tela Parâmetros Equivalente de Rede da Concessionária' in the ANAFAS software. The interface is divided into several sections:

- Identificação:** Includes fields for 'Barra' (set to 1), 'Nome' (CONCESSARIA), 'Área' (dropdown), 'Grupo' (set to 1), 'Nome' (REDE), and a 'Ligado' checkbox.
- Sequência Positiva:** Fields for 'Resistência (R1 %)' (0.9) and 'Reatância Subtransitória (X''d %)' (69.38).
- Sequência Zero:** Fields for 'Resistência (R0 %)' (0) and 'Reatância (X0 %)' (63.5).
- Tipo de Conexão:** Radio buttons for 'Delta', 'Estrela não aterrado', and 'Estrela aterrado' (selected). It also includes fields for 'Resistência de Aterramento (Rn %)' and 'Reatância de Aterramento (Xn %)', both set to 0.
- Despacho:** Fields for 'Geração Ativa (MW)' and 'Geração Reativa (MVar)', both set to 0.

Fonte: Ilustração própria obtida com uso do software ANAFAS.

Figura 4.3 – Tela Parâmetros dos Cabos da Rede de Distribuição

The screenshot shows the 'Tela Parâmetros dos Cabos da Rede de Distribuição' in the ANAFAS software. The interface is divided into two main sections, each with its own 'Identificação' and parameter fields:

Top Section:

- Identificação:** 'Barra De' (1), 'Barra Para' (2), 'Nome' (CONCESSARIA), 'Nome' (INT1), 'Número do Circuito' (1), 'Área' (dropdown), 'Nome' (MT1), 'Comprimento (km)' (0), and 'Ligado' checkbox.
- Sequência Positiva:** 'Resistência (R1 %)' (31.63), 'Susceptância (S1 Mvar)' (0), 'Reatância (X1 %)' (57.28).
- Sequência Zero:** 'Resistência (R0 %)' (56.58), 'Susceptância (S0 Mvar)' (0), 'Reatância (X0 %)' (273.37).

Bottom Section:

- Identificação:** 'Barra De' (2), 'Barra Para' (3), 'Nome' (INT1), 'Nome' (SE_CLIENTE), 'Número do Circuito' (2), 'Área' (dropdown), 'Nome' (MT2), 'Comprimento (km)' (0), and 'Ligado' checkbox.
- Sequência Positiva:** 'Resistência (R1 %)' (18.65), 'Susceptância (S1 Mvar)' (0), 'Reatância (X1 %)' (9.67).
- Sequência Zero:** 'Resistência (R0 %)' (22.39), 'Susceptância (S0 Mvar)' (0), 'Reatância (X0 %)' (41.69).

Fonte: Ilustração própria obtida com uso do software ANAFAS.

Figura 4.4 – Tela Parâmetros dos Transformadores TR-1/2/3

Identificação	
Primário: 3	Nome: SE_CLIENTE
Secundário: 4	Nome: QGBT.01
Número do Circuito: 1	Nome: TR-1
Área: 0	☒ Ligado
Sequência Positiva	
Resistência (R1 %): 0	Reatância (X1 %): 1100
Sequência Zero	
Resistência (R0 %): 0	Reatância (X0 %): 1100
Tipo de Conexão do Primário	
☒ Delta Δ	Resistência de Aterramento (Rn %): 0
☐ Estrela não aterrado Y	Reatância de Aterramento (Xn %): 0
☐ Estrela aterrado Y	
Tipo de Conexão do Secundário	
☐ Delta Δ	Resistência de Aterramento (Rn %): 0
☐ Estrela não aterrado Y	Reatância de Aterramento (Xn %): 0
☒ Estrela aterrado Y	
Defasamento (°): 30 ☒ ΔY	Tap (pu): 1
☐ Explícito:	
Obs: def. do secundário em relação ao primário.	

Fonte: Ilustração própria obtida com uso do software ANAFAS.

Figura 4.5 – Tela Parâmetros dos Geradores GG-01/02

Identificação		
Barra: 4	Nome: QGBT.01	Área:
Grupo: 2	Nome: GG-01	☒ Ligado
Sequência Positiva		
Resistência (R1 %): 0	Reatância Subtransitória (X"d %): 2080	
Sequência Zero		
Resistência (R0 %): 0	Reatância (X0 %): 1280	
Tipo de Conexão		Despacho
☐ Delta Δ	Resistência de Aterramento (Rn %): 0	Geração Ativa (MW): 0
☐ Estrela não aterrado Y	Reatância de Aterramento (Xn %): 0	Geração Reativa (MVar): 0
☒ Estrela aterrado Y		
Identificação		
Barra: 5	Nome: QGBT.02	Área:
Grupo: 3	Nome: GG-02	☒ Ligado
Sequência Positiva		
Resistência (R1 %): 0	Reatância Subtransitória (X"d %): 3733.33	
Sequência Zero		
Resistência (R0 %): 0	Reatância (X0 %): 2666.67	
Tipo de Conexão		Despacho
☐ Delta Δ	Resistência de Aterramento (Rn %): 0	Geração Ativa (MW): 0
☐ Estrela não aterrado Y	Reatância de Aterramento (Xn %): 0	Geração Reativa (MVar): 0
☒ Estrela aterrado Y		

Fonte: Ilustração própria obtida com uso do software ANAFAS.

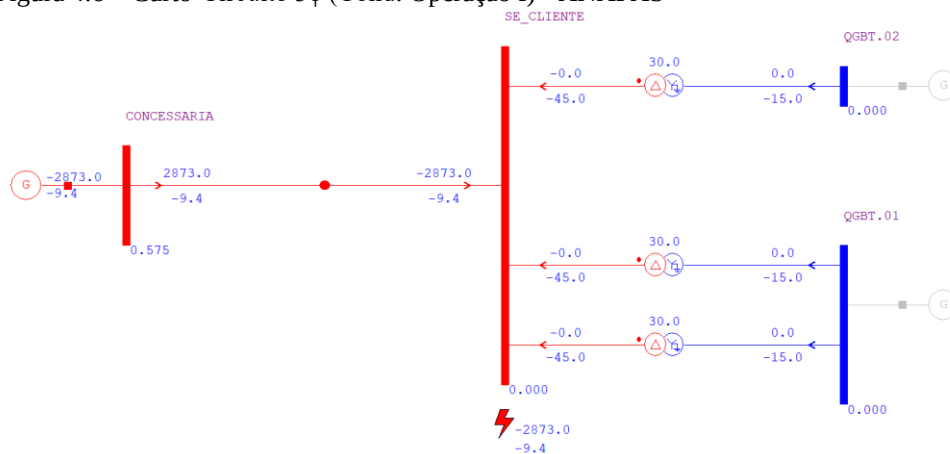
4.3 Determinação dos Níveis de Curto-Circuito

Da mesma forma como realizado no capítulo anterior, os cálculos análise aqui é efetuada para os cenários de operação definidos na seção 1) do tópico 3.1: Condição de Operação I e II.

4.3.1 Cálculo do Níveis de Curto-Circuito para Condição de Operação I

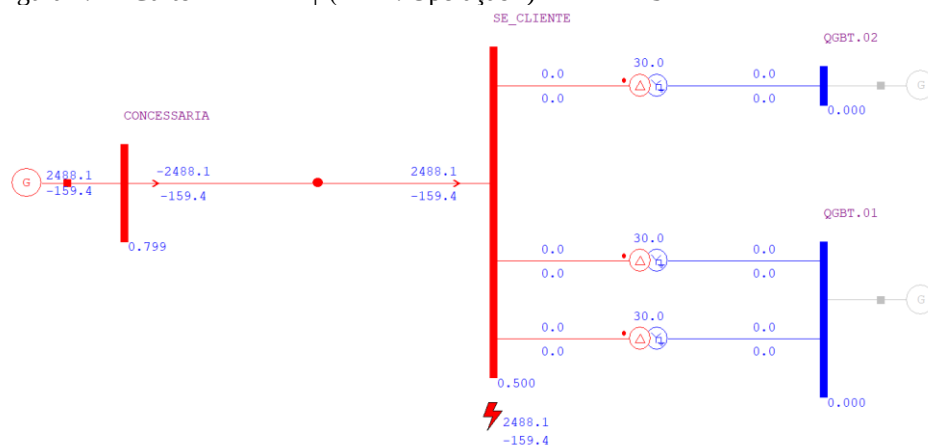
Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 são exibidos os resultados dos Níveis Curto-Circuito para Falta trifásica, bifásica e monofásica respectivamente para o Condição de Operação I:

Figura 4.6 – Curto-Circuito 3 ϕ (Cond. Operação I) - ANAFAS



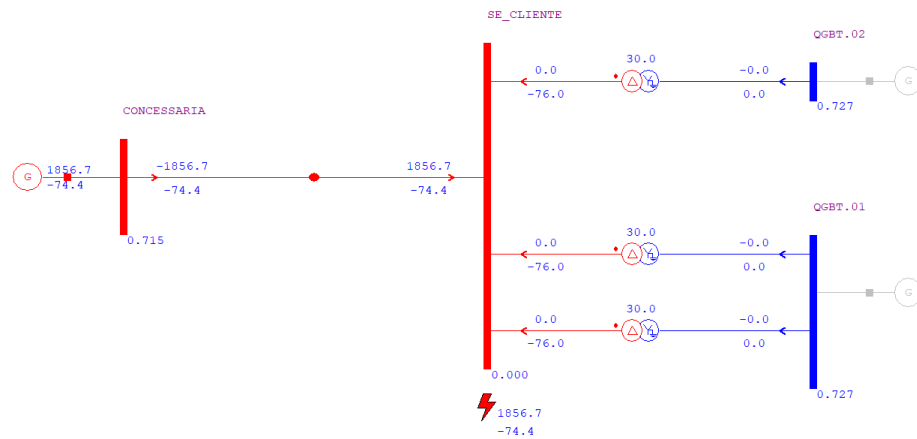
Fonte: Ilustração própria obtida a partir do software ANAFAS

Figura 4.7 – Curto-Circuito 2ϕ (Cond. Operação I) - ANAFAS



Fonte: Ilustração própria obtida a partir do software ANAFAS.

Figura 4.8 – Curto-Circuito 1 ϕ (Cond. Operação I) - ANAFAS



Fonte: Ilustração própria obtida a partir do software ANAFAS.

Tabela 4.1 – Resumo Níveis de Falta – Cond. Operação I - ANAFAS

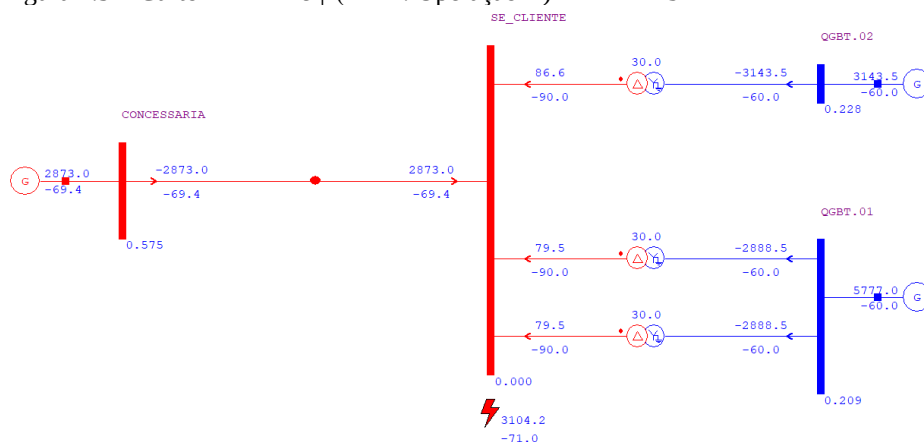
Barra	Tipo de Falta		
	Trifásica (kA)	Bifásica (kA)	Monofásica(kA)
B-01-Barra do Ponto de Entrega do Cliente	2,873	2,488	1,857

Fonte: Tabela própria.

4.3.2 Cálculo do Níveis de Curto-Circuito para Condição de Operação II

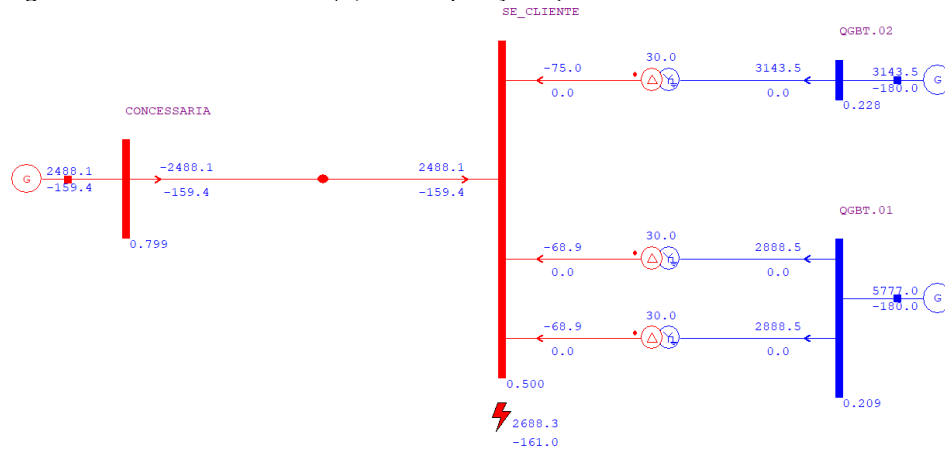
Nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 são exibidos os resultados dos Níveis Curto-Circuito para Falta trifásica, bifásica e monofásica no respectivamente para o Condição de Operação II:

Figura 4.9 – Curto-Circuito 3φ (Cond. Operação II) - ANAFAS



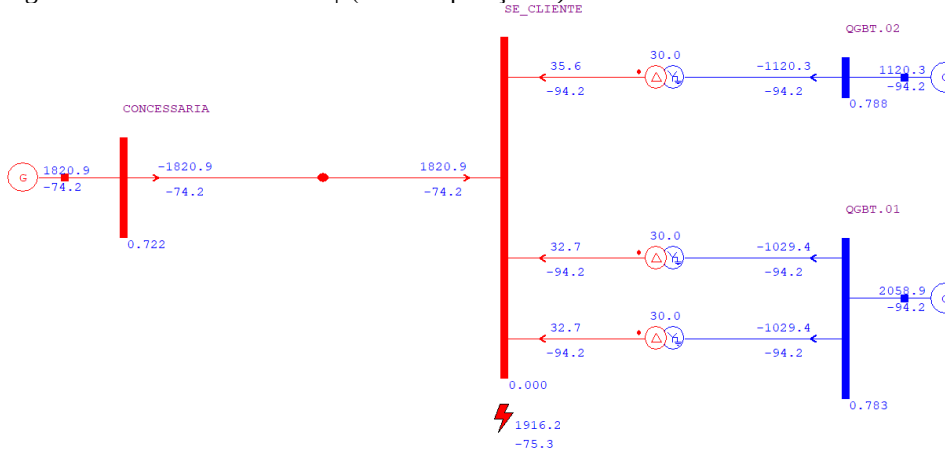
Fonte: Ilustração própria obtida a partir do software ANAFAS

Figura 4.10 – Curto-Circuito 2φ (Cond. Operação II) - ANAFAS



Fonte: Ilustração própria obtida a partir do software ANAFAS.

Figura 4.11 – Curto-Circuito 1φ (Cond. Operação II) - ANAFAS



Fonte: Ilustração própria obtida a partir do software ANAFAS.

Tabela 4.2 – Resumo Níveis de Falta – Cond. Operação II - ANAFAS

Barra	Tipo de Falta								
	Trifásica (kA)			Bifásica (kA)			Monofásica(kA)		
	Contribuição CONCESSIONÁRIA	Contribuição CLIENTE	Total	Contribuição CONCESSIONÁRIA	Contribuição CLIENTE	Total	Contribuição CONCESSIONÁRIA	Contribuição CLIENTE	Total
B-01-Barra do Ponto de Entrega do Cliente	2,873	0,246	3,104	2,488	0,213	2,688	1,821	0,101	1,916

Fonte: Tabela própria.

4.4 Estudo da Proteção do Sistema

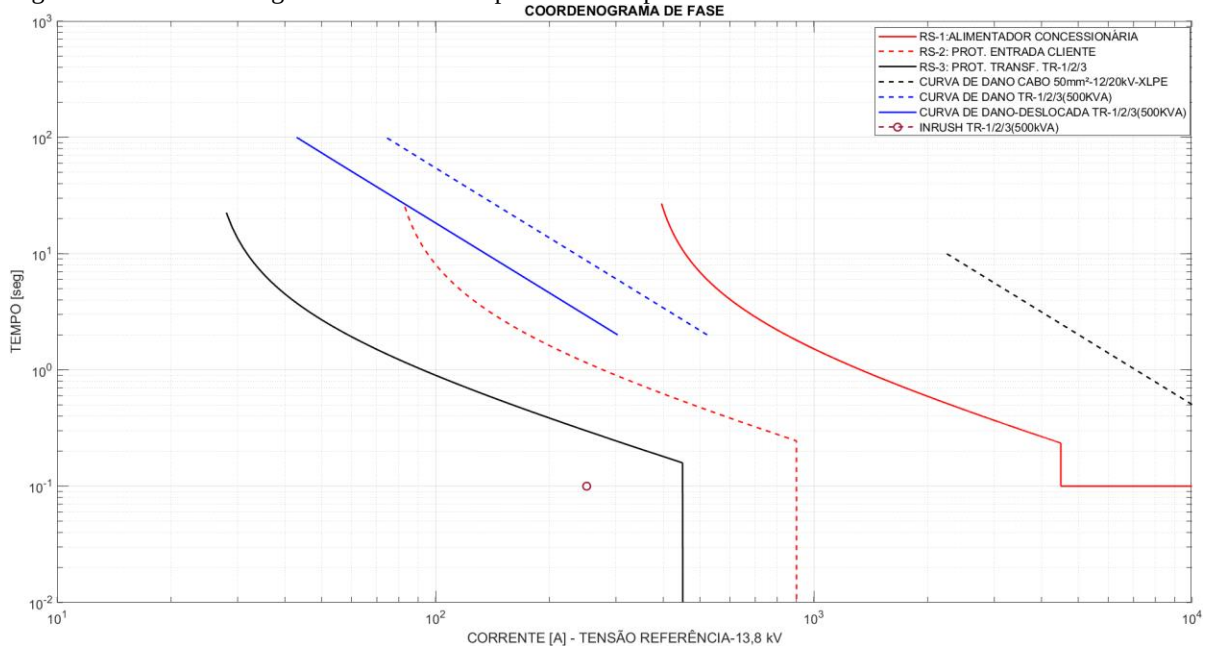
Da mesma forma como realizado no capítulo anterior, a coordenação e a seletividade do estudo da proteção será avaliado nessa seção, para tal intento, usa-se um *Script* no Matlab para elaboração dos Coordenogramas de seletividade desenvolvido no Apêndice A

desta monografia com o objetivo de otimizar o tempo de elaboração ao mesmo tempo que garante a qualidade, a robustez e a confiabilidade das informações.

4.4.1 Coordenogramas

Executando o Script Matlab desenvolvido no Apêndice A com os ajustes dos relés de proteção do Sistema Industrial utilizado como estudo de caso no capítulo 2 dessa monografia, obtiveram-se os Coordenogramas de fase (Fig. 4.12) e neutro (4.13):

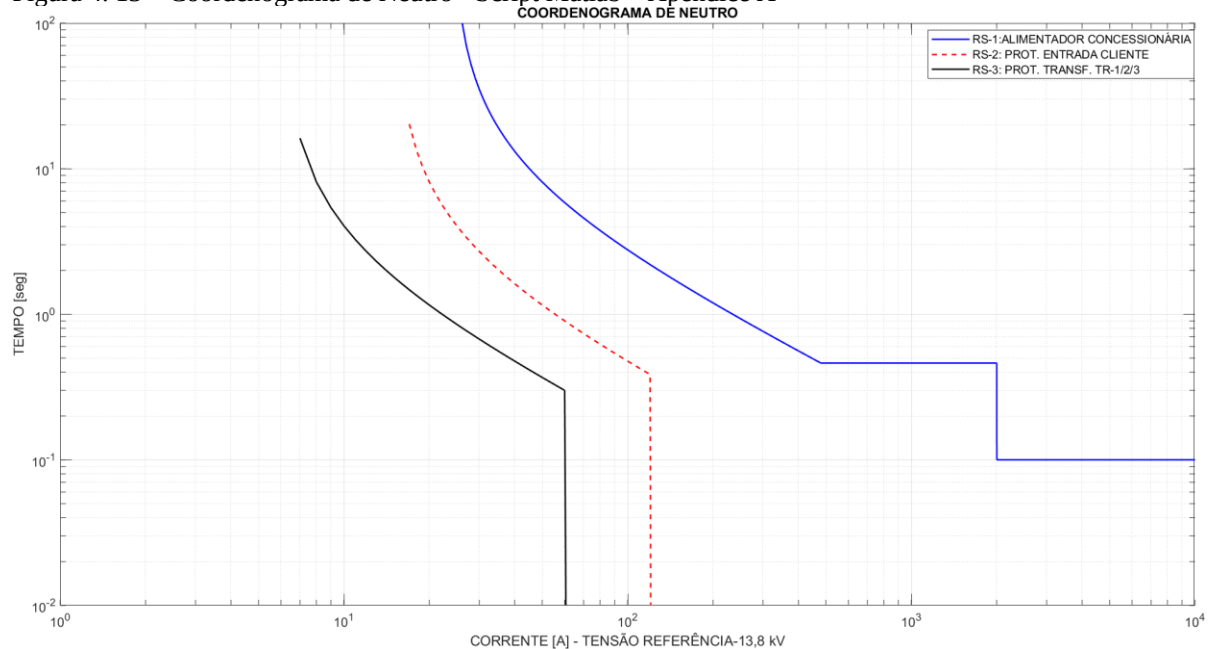
Figura 4.12 – Coordenograma de Fase – Script Matlab – Apêndice A



Fonte: Ilustração própria obtida a partir do Script Matlab – Apêndice A.

Através dos Coordenogramas apresentados na figura 4.12, é possível observar que o sistema de proteção se encontra adequadamente coordenado e seletivo para Falta Trifásicas e Bifásicas. Observa-se que a curva de atuação do relé de proteção dos transformadores TR-1/2/3(500kVA) (RS-3/4/5) está posicionada acima da corrente de magnetização e abaixo da curva de suportabilidade térmica do transformador (Curva ANSI), bem como está posicionada antes da curva de atuação do relé de proteção geral de entrada da SE CLIENTE (RS-2), que por sua vez está atuando antes do relé de proteção do alimentador da CONCESSIONÁRIA (RS-1).

Figura 4. 13 – Coordenograma de Neutro - Script Matlab – Apêndice A



Fonte: Ilustração própria obtida a partir do Script Matlab – Apêndice A.

Com base nas informações apresentadas na figura 4.13, é possível observar que o sistema de proteção se encontra adequadamente coordenado e seletivo para Falta Monofásicas. Verifica-se que a curva de atuação do relé proteção dos transformadores TR-1/2/3(500kVA) (RS-3/4/5) está posicionada antes da curva de atuação do relé de proteção geral de entrada da SE CLIENTE (RS-2), que por sua vez está atuando antes do relé de proteção do alimentador da CONCESSIONÁRIA (RS-1).

Através das Coordenogramas apresentadas nas figuras 4.12 e 4.13, é possível observar que o sistema de proteção se encontra adequadamente coordenado e seletivo tendo em vista que o intervalo de Coordenação (200ms a 300ms) entre dos relés de proteção digital do Sistema Industrial utilizado como estudo de caso dessa monografia esteja sendo respeitado. Os responsáveis por esse atraso são os seguintes fatores (IEEE Std. 242, 2001) [10].

- Tempo de abertura do disjuntor: entre 5 a 8 ciclos (80 ms a 133 ms);
- Tolerância dos ajustes do relé: 170 ms desprezando a calibração do relé e 120 ms, considerando que o mesmo fora calibrado em campo.

CAPÍTULO 5

AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS METODOLOGIAS

A fim de validar a proposta de otimização com a utilização de ferramentas computacionais apresentada nessa monografia, é feita neste capítulo uma avaliação dos resultados das duas metodologias: elaboração manual da forma como é hoje (capítulo 3) e com utilização de ferramentas computacionais (capítulo 4). Sob duas óticas bem distintas, a qualitativa e a quantitativa, alguns dos resultados obtidos com ambos os métodos são postos lado-a-lado a fim de detectar o quão próximos estão um do outro.

5.1 Considerações Gerais

Com o objetivo de avaliar da melhor maneira possível as metodologias de elaboração de estudo de coordenação e seletividade desenvolvidas nos dois capítulos anteriores, serão comparadas aqui três categorias assim definidas:

- a) Os níveis de curto-circuito nas barras do sistema;
- b) Os coordenogramas de fase e neutro;
- c) Os tempos de elaboração do estudo de coordenação e seletividade.

Os níveis de curto-circuito serão avaliados de forma quantitativa, com o uso da ferramenta matemática *Erro Relativo Percentual (%)*, observando o quão distante do valor calculado estão os valores obtidos com o *Software ANAFAS*.

O *Erro Relativo Percentual* ($E_{\%}$) pode ser definido da seguinte forma:

$$E_{\%} = \frac{|X - X'|}{X} \cdot 100\% \quad (4)$$

em que X representa o valor real de uma determinada grandeza e X' representa o valor medido da mesma grandeza.

Os coordenogramas serão avaliados e comparados de forma qualitativa, comparando de forma visual o quão os gráficos obtidos de forma manual estão ou não semelhantes aos gráficos gerados pelo *Script* desenvolvido no MATLAB (Apêndice A).

O tempo de elaboração será avaliado, de forma quantitativa, comparando o tempo necessário para elaboração do Sistema Industrial Utilizado com Estudo de Caso nessa monografia, com e sem o uso da ferramenta computacional e de forma quantitativa, serão

medidos os tempos das respectivas elaborações para a experiência citada determinando qual elaboração foi mais rápida e de quanto foi essa melhora na velocidade.

5.2 Comparação #1 – Níveis de Falta nas Barras do Sistema

A partir dos dados obtidos nos dois capítulos anteriores e utilizando-se da definição de $E\%$, montaram-se as seguintes tabelas que condensam as informações mais importantes para a análise comparativa:

Tabela 5.1 – Comparação Manual/ANAFAS - Níveis de Falta – Cond. Operação I

Barra	Tipo de Falta								
	Trifásica (kA)			Bifásica (kA)			Monofásica(kA)		
	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)
B-01-Barra do Ponto de Entrega do Cliente	2,873	2,873	0,00%	2,488	2,488	0,00%	1,857	1,857	0,00%

Fonte: Tabela própria.

Tabela 5.2 – Comparação Manual/ANAFAS - Níveis de Falta 3 ϕ – Cond. Operação II

Barra	Contribuição CONCESSIONARIA			Contribuição CLIENTE			Total		
	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)
B-01-Barra do Ponto de Entrega do Cliente	2,873	2,873	0,00%	0,246	0,246	0,00%	3,104	3,104	0,00%

Fonte: Tabela própria.

Tabela 5. 3 – Comparação Manual/ANAFAS - Níveis de Falta 2 ϕ – Cond. Operação II

Barra	Contribuição CONCESSIONARIA			Contribuição CLIENTE			Total		
	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)
B-01-Barra do Ponto de Entrega do Cliente	2,488	2,488	0,00%	0,213	0,213	0,00%	2,688	2,688	0,00%

Fonte: Tabela própria.

Tabela 5.4 – Comparação Manual/ANAFAS - Níveis de Falta 1 ϕ - Cond. Operação II

Barra	Contribuição CONCESSIONARIA			Contribuição CLIENTE			Total		
	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)	Manual (kA)	ANAFAS (kA)	E(%)
B-01-Barra do Ponto de Entrega do Cliente	1,821	1,821	0,00%	0,101	0,101	0,00%	1,916	1,916	0,00%

Fonte: Tabela própria.

De acordo com as tabelas acima, os erros relativos calculados podem ser considerados desprezíveis; muito dos valores encontrados foram de 0%. Esses erros, além de desprezíveis, também são esperados, haja vista a utilização de duas metodologias para obtenção do mesmo parâmetro: como foi visto, no Capítulo 3 utilizou-se a metodologia tradicional apresentada em [15], já no Capítulo 4, com o ANAFAS, utilizou-se a metodologia apresentada

em [11]. Isso prova que, para esse parâmetro de comparação (níveis de falta), o ANAFAS satisfaz completamente as expectativas e pode ser usado sem problemas para os cálculos dos níveis de curto-circuito necessários na elaboração de estudos de coordenação e seletividade.

5.3 Comparação #2 – Coordenogramas

Fazendo uma comparação visual entre a Figura 3.5 e a Figura 4.12, para os coordenogramas de fase e entre a Figura 3.6 e a Figura 4.13 para os coordenogramas de neutro, observa-se que coordenogramas (fase/neutro) obtidos através da metodologia manual e dos obtidos com o Script desenvolvido no Matlab, são extremamente semelhantes a menos pelo design, o que se justifica perfeitamente por terem sido gerados em ambientes computacionais completamente diferentes (Microsoft Office Professional Plus Excel 2016 e Script desenvolvido no Matlab).

Um detalhe positivo para o Script desenvolvido no Matlab (Apêndice A) é a geração das informações de cada curva exibida nos coordenogramas, isso, além de facilitar a identificação de cada curva exibida, proporciona uma visão geral de cada dispositivo; para os relés, por exemplo, é possível visualizar de forma rápida a faixa de graduação de cada unidade de proteção (temporizada e instantânea) de fase e de neutro. O desenvolvimento desse recurso pelo Microsoft Office Professional Plus Excel 2016 também é possível, no entanto seria deveras trabalhoso para o projetista catalogar todas essas informações e incluí-las nos gráficos manualmente.

5.4 Comparação #3 – Tempo de Elaboração do Estudo de Coordenação e Seletividade

Basicamente, o intuito aqui é verificar qual metodologia foi mais otimizada na elaboração do estudo de coordenação e seletividade do Sistema Industrial utilizado com Estudo de Caso dessa monografia (Capítulo 2). O tempo levado em consideração é aquele restrito à elaboração, ou seja, não se leva em consideração qualquer interferência que possa ter tirado a atenção do especialista de proteção, por exemplo, o especialista teve de parar a elaboração do estudo para atender a um telefonema ou para o intervalo de almoço, esse tempo gasto com a atividade não relacionada à elaboração do estudo foi descontado do tempo total.

1) Tempos de Elaboração do Estudo de Coordenação e Seletividade – Estudo de Caso

$$\begin{aligned} t_{\text{manual}} &= 11,48 \text{ h} \\ t_{\text{Ferramentas_Computacionais}} &= 4,16 \text{ h} \end{aligned} \quad (5)$$

2) Ganho de Velocidade no Tempo de Elaboração

$$G_V = \left| 1 - \frac{t_{\text{manual}}}{t_{\text{Ferramentas_Computacionais}}} \right| = \left| 1 - \frac{11,48}{4,16} \right| \Rightarrow G_V = 176 \% \quad (6)$$

Como se pode observar, o método mais otimizado foi o que utiliza a ferramenta computacional (ANAFAS + Script Matlab) e esse aumento na velocidade de elaboração ficou em torno de 176%, ou seja, utilizando ferramentas computacionais (capítulo 4), o tempo gasto com a elaboração do estudo foi quase um terço do tempo gasto quando comparada com o método manual (capítulo 3). Assim, é fácil ver como a metodologia utilizando ferramentas computacionais tais como o ANAFAS é significativamente mais eficiente que a metodologia tradicional, além de garantir planejamento futuro da expansão do sistema, visto que é possível simular diversos cenários diferentes.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Ao longo das últimas décadas, a demanda de projetos de geração particular cresceu assustadoramente no Brasil, muito disso se deve à crise energética pela qual o país passou no início dos anos 2000, que fez com que as grandes e médias indústrias ficassem alertas para o fato de que a falta de energia elétrica poderia trazer prejuízos inestimáveis à produção. No entanto, uma instalação com geração particular só vai ser técnico-economicamente viável se houver a interligação com a rede pública de energia, a qual promove mais confiabilidade ao sistema próprio. Assim, com uma crescente demanda de projetos de geração de energia, e a dificuldade em desenvolver esse tipo de estudo de coordenação e seletividade nas empresas de engenharia é que este trabalho propôs uma metodologia, voltada para projetistas, visando a otimização do processo de agilizar o desenvolvimento de projetos com o uso dos softwares ANAFAS e MATLAB e consequentemente aumentar a produção de projetos possibilitando atendimento das eventuais grandes demandas.

Como foi visto nessa monografia, o estudo de caso realizado nos capítulos 3, 4 e 5 provam que o ANAFAS para cálculo dos níveis de curto-circuito e Script MATLAB para gerar as curvas de seletividade é uma solução tecnicamente viável. Quando a elaboração de um estudo de coordenação e seletividade de um projeto da forma como é feito hoje, de forma manual (Capítulo 3), é notória a quantidade e a complexidade das informações que o projetista deve levar em consideração mesmo com um simples projeto de sistema de geração de energia; fala-se “simples”, pois a planta industrial fictícia estudada é bastante pequena, possui apenas três transformadores e dois geradores, alterando isso, o projeto pode ficar ainda maior e mais complexo. Já a elaboração lançada no Capítulo 4, no entanto com o uso de ferramentas computacionais (através do uso do software ANAFAS para os cálculos de níveis de curto-circuito e um *Script* no MATLAB para elaboração dos Coordenogramas de seletividade) (Capítulo 4), levou pouco mais de um terço do tempo gasto quando comparada com o método manual, é uma diferença espantosa. No Capítulo 5, é feita uma avaliação quantitativa e qualitativa das metodologias empregadas o que mostra claramente as vantagens de utilização de ferramentas Computacionais (ANAFAS, MATLAB, etc) sobre a metodologia manual: os níveis de falta nas barras do sistema e os tempos de atuação da proteção são praticamente os mesmos, os erros medidos são insignificantes, os coordenogramas, salvo o design, haja vista terem sido elaborados em softwares distintos, são idênticos e o ganho de velocidade no tempo

de elaboração com a utilização de ferramentas computacionais supera 176%. Assim, é fácil ver como a metodologia utilizando ferramentas computacionais tais com o ANAFAS é significativamente mais eficiente que a metodologia tradicional, além de garantir planejamento futuro da expansão do sistema, visto que é possível simular diversos cenários diferentes. Dessa forma, pode ser notado que tecnicamente o uso dos softwares ANAFAS e MATLAB é completamente viável e sem dúvida traria maior agilidade e eficiência no processo de elaboração e redução de erros.

A autoprodução e a geração distribuída (GD) vem se consolidando cada vez nos últimos anos, contribuindo para o crescimento na oferta interna de energia elétrica. As fontes hídrica, biomassa e eólica vem ganhando espaço, ao mesmo tempo em que a geração fóssil recua, com queda de participação do gás natural, carvão e derivados do petróleo. Quando essa tendência realmente se consolidar e entrar em operação, a demanda de projetos de geração própria que serão interligadas a rede elétrica pública, que já é grande, tende a aumentar e fica cada vez mais complexas, é possível que a atual metodologia de elaboração de estudo de coordenação e seletividade desse tipo de projeto fique insustentável e a adoção de ferramentas computacionais torne-se imperativa.

REFERÊNCIAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>>. Acesso em 24 de outubro de 2022.
- [2] ENEL DISTRIBUIÇÃO CEARÁ. **Decisão Técnica DT-104/2010 R-03 - Instruções para Instalação de Geradores Particulares**. Normas e Procedimentos. Fortaleza, p. 17. 2010.
- [3] ENEL DISTRIBUIÇÃO CEARÁ. Área de Planejamento AT/MT. Fortaleza. 2022.
- [4] WEG. **Transformadores a Seco**. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-a-Seco/M%C3%A9dio-%28At%C3%A9-3-000-kVA%29/Transformador-Seco-500-0kVA-13-8-0-38kV-CST-IP-21-AN/p/15653387>>. Acesso em: 22 Outubro 2022.
- [5] KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 4ª. ed. Florianópolis: do autor, 2007.
- [6] CUMMINS. **Generator Manuals**. Disponível em: < <https://www.cummins.com/parts/manuals-and-technical-documents>>. Acesso em: 28 Outubro 2022.
- [7] SCHNEIDER ELECTRIC. **Easergy P3U30**. Disponível em: < <https://www.se.com/br/pt/product-range/64884-rel%C3%A9s-de-prote%C3%A7%C3%A3o-easergy-p3/>>. Acesso em: 22 Outubro 2022.
- [8] KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2ª. ed. Florianópolis: do autor, v. 1, 2005.
- [9] ENEL DISTRIBUIÇÃO CEARÁ. Área de Análise de Projetos de SE Particulares Classe 15 kV. Fortaleza. 2022.
- [10] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 242: IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems**. 2001.
- [11] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60909: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems**. [S.l.]. 2001.
- [12] FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

- [13] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa N° 414/2010: Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**. Brasília. 2012.
- [14] CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL) (CEPEL). **ANAFAS -Análise de Falhas Simultâneas, 2017**. Disponível em: <<https://www.cepel.br/produtos/anafas-2/>>. Acesso em: 28 Outubro 2022.

APÊNDICE A

SCRIPT MATLAB PARA ELABORAÇÃO DOS COORDENOGRAMAS DE SELETIVIDADE

```

%CENTRO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
%DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
%CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
%PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA PARA CONCLUSÃO DE CURSO
%SCRIPT MATLAB PARA ELABORAÇÃO DE GRÁFICOS DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE
%Aluna: GILCÉLIA DO AMARAL DA SILVEIRA
clear all
clc

% A.1 - DADOS DE ENTRADA
% A.1.1 - Dados de Ajustes do Relé de Proteção do Alimentador da
Concessionária (RS-1):
% A.1.1.1 - Ajustes de Fase (51/50)
Ipk_rs1_51=360;      % Ajuste da Corrente de Pickup de Fase RELÉ RS-1
Dial_rs1_51=0.20;    % Ajuste do Dial de Tempo RELÉ RS-1
a_rs1=1; k_rs1=13.5; %Fatores Alpha=1 e k=13.5 (Muito Inversa IEC)RELÉ RS-1
Ipk_rs1_50=4500;     %Ajuste Corrente de Pickup Instantânea de Fase RELE RS-1
Ta_rs1_50=0.10;      %Tempo Ajuste da Unidade Instantânea de Fase RELE RS-1
% A.1.1.2 - Ajustes de Fase (51N/50N)
Ipk_rs1_51N=24;      %Ajuste da Corrente de Pickup de Neutro RELÉ RS-1
Dial_rs1_51N=0.65;   %Ajuste do Dial de Tempo Neutro RELÉ RS-1
an_rs1=1; kn_rs1=13.5; %Fatores Alpha=1 e k=13.5 (M.I IEC) RELÉ RS-1
Ipk_rs1_50N=2000;    %Ajuste Corrente de Pickup Instantânea de Neutro RELE RS-1
Ta_rs1_50N=0.10;     %Tempo Ajuste da Unidade Instantânea de Neutro RELE RS-1
% A.1.2 - Dados de Ajustes do Relé de Proteção Geral da Subestação do
Cliente (RS-2):
% A.1.2.1 - Ajustes de Fase (51/50)
Ipk_rs2_51=75;       %Ajuste da Corrente de Pickup de Fase RELÉ RS-2
Dial_rs2_51=0.20;    %Ajuste do Dial de Tempo RELÉ RS-2
a_rs2=1; k_rs2=13.5; %Fatores Alpha=1 e k=13.5(Muito Inversa IEC)RELÉ RS-2
Ipk_rs2_50=900;      %Ajuste da Corrente de Pickup Instantânea de Fase RELE RS-2
Ta_rs2_50=0.001;%Tempo Ajuste da Unidade Instantânea de Fase RELE RS-2
% A.1.2.2 - Ajustes de Fase (51N/50N)
Ipk_rs2_51N=20;      %Ajuste da Corrente de Pickup de Neutro RELÉ RS-2
Dial_rs2_51N=0.2;    % Ajuste do Dial de Tempo Neutro RELÉ RS-2
an_rs2=1; kn_rs2=13.5; %Fatores Alpha=1 e k=13.5 (M.I IEC)RELÉ RS-2
Ipk_rs2_50N=72;      %Ajuste Corrente de Pickup Instantânea de Neutro RELE RS-2
Ta_rs2_50N=0.001;    %Tempo Ajuste da Unidade Instantânea de Neutro RELE RS-2
% A.1.3 - Dados de Ajustes do Relé de Proteção dos Transformadores TR-1/2/3
de 500kVA (RS-3/4/5):
% A.1.3.1 - Ajustes de Fase (51/50)
Ipk_rs3_51=21;       %Ajuste da Corrente de Pickup de Fase RELÉ RS-3
Dial_rs3_51=0.20;    %Ajuste do Dial de Tempo RELÉ RS-3
a_rs3=1; k_rs3=13.5; %Fatores Alpha=1 e k=13.5 (Muito Inversa IEC)RELÉ RS-3
Ipk_rs3_50=450;      %Ajuste da Corrente de Pickup Instantânea de Fase RELE RS-3
Ta_rs3_50=0.001;     %Tempo Ajuste da Unidade Instantânea de Fase RELE RS-3
% A.1.3.2 - Ajustes de Fase (51N/50N)
Ipk_rs3_51N=7;       %Ajuste da Corrente de Pickup de Neutro RELÉ RS-3
Dial_rs3_51N=0.2;    %Ajuste do Dial de Tempo Neutro RELÉ RS-3
an_rs3=1; kn_rs3=13.5; %Fatores Alpha=1 e k=13.5(M.I IEC)RELÉ RS-3
Ipk_rs3_50N=50;      %Ajuste Corrente de Pickup Instantânea de Neutro RELE RS-3
Ta_rs3_50N=0.001;%Tempo Ajuste da Unidade Instantânea de Neutro RELE RS-3

```

```

% A.1.4 - Dados dos Cabos de Média Tensão para Gerar a Curva de Dano com
Relação ao Curto-Circuito
% Cabo XLPE 12/20kV de Cobre - 3F-1/Cx50mm²
Sc=50; %Seção Transversal do Cabo em mm²
T1=90;%T1-Máxima Temperatura Admissível no Condutor em Operação Normal (°C)
T2=250;%T2-Máxima Temperatura Admissível no Condutor no Curto-Circuito (°C)
% A.1.5 - Dados dos Transformadores de Potência TR-1/2/3 (500kVA) para
Gerar a Curva de Dano (Curva ANSI)
Sn=500; %Potência em kVA do Transformador de Potência
Vn=13.8; %Tensão Nominal(kV) do Transformador de Potência
Z=5.5; %Impedância em % do Transformador de Potência
In=(Sn)/((sqrt(3)*Vn)); %Cálculo Corrente Nominal Transf. de Potência
% A.1.6 - Cálculo da Corrente de Inrush Transformador de Potência TR-1/2/3
(500kVA)
Iinrush=12*In; %Para Transf. a SECO a Corr. Inrush é 12xIn por 0.100s
Tinrush=0.100;
%A.2 - ROTINAS DE ELABORAÇÃO DE GRÁFICOS DE SELETIVIDADE DOS RELÉS DE
%PROTEÇÃO E EQUIPAMENTOS (CABOS/TRANSFORMADORES)
%A.2.1 - Rotina para elaboração do Gráfico do Relé de Proteção Alimentador
da Concessionária (RS-1):
j=round(1.1*Ipksl_51);

for i=j:10000
    c_rsl(i)=i;
    m(i)=i/Ipksl_51;
    if(i<=Ipksl_50)
        if(m(i)<=20)
            t_rsl(i)=(k_rsl*Dial_rsl_51)/((m(i))^(a_rsl)-1);
        else(m(i)>20)
            t_rsl(i)=(k_rsl*Dial_rsl_51)/((20)^(a_rsl)-1);
        end
    else
        t_rsl(i)=Ta_rsl_50;
    end
end

j=round(1.1*Ipksl_51N);

for i=j:10000
    cn_rsl(i)=i;
    m(i)=i/Ipksl_51N;
    if(i<=Ipksl_50N)
        if(m(i)<=20)
            tn_rsl(i)=(kn_rsl*Dial_rsl_51N)/((m(i))^(an_rsl)-1);
        else(m(i)>20)
            tn_rsl(i)=(kn_rsl*Dial_rsl_51N)/((20)^(an_rsl)-1);
        end
    else
        tn_rsl(i)=Ta_rsl_50N;
    end
end

%A.2.2 - Rotina para elaboração do Gráfico do Relé de Proteção Geral da
Subestação do Cliente (RS-2):

j=round(1.1*Ipksl_51);

for i=j:10000
    c_rs2(i)=i;
    m(i)=i/Ipksl_51;
    if(i<=Ipksl_50)

```

```

        if(m(i)<=20)
            t_rs2(i)=(k_rs2*Dial_rs2_51)/((m(i))^(a_rs2)-1);
        else(m(i)>20)
            t_rs2(i)=(k_rs2*Dial_rs2_51)/((20)^(a_rs2)-1);
        end
    else
        t_rs2(i)=Ta_rs2_50;
    end
end

j=round(1.1*Ipk_rs2_51N);

for i=j:10000
    cn_rs2(i)=i;
    m(i)=i/Ipk_rs2_51N;
    if(i<=Ipk_rs2_50N)
        if(m(i)<=20)
            tn_rs2(i)=(kn_rs2*Dial_rs2_51N)/((m(i))^(an_rs2)-1);
        else(m(i)>20)
            tn_rs2(i)=(kn_rs2*Dial_rs2_51N)/((20)^(an_rs2)-1);
        end
    else
        tn_rs2(i)=Ta_rs2_50N;
    end
end

%A.2.3 - Rotina para elaboração do Gráfico dos Relés de Proteção dos
Transformadores TR-1/2/3 de 500kVA (RS-3/4/5)

j=round(1.1*Ipk_rs3_51);

for i=j:10000
    c_rs3(i)=i;
    m(i)=i/Ipk_rs3_51;
    if(i<=Ipk_rs3_50)
        if(m(i)<=20)
            t_rs3(i)=(k_rs3*Dial_rs3_51)/((m(i))^(a_rs3)-1);
        else(m(i)>20)
            t_rs3(i)=(k_rs3*Dial_rs3_51)/((20)^(a_rs3)-1);
        end
    else
        t_rs3(i)=Ta_rs3_50;
    end
end

j=round(1.1*Ipk_rs3_51N);

for i=j:10000
    cn_rs3(i)=i;
    m(i)=i/Ipk_rs3_51N;
    if(i<=Ipk_rs3_50N)
        if(m(i)<=20)
            tn_rs3(i)=(kn_rs3*Dial_rs3_51N)/((m(i))^(an_rs3)-1);
        else(m(i)>20)
            tn_rs3(i)=(kn_rs3*Dial_rs3_51N)/((20)^(an_rs3)-1);
        end
    else
        tn_rs3(i)=Ta_rs3_50N;
    end
end

```

```
%A.2.4 - Rotina para elaboração do Gráfico da Curva de Dano com Relação ao
Curto-Circuito
% Cabo XLPE 12/20kV de Cobre - 3F-1/Cx50mm2
tac=[0.01 1 10]; %As curvas de dano dos cabos serão traçadas em 3 décadas
de tempo (0.01s, 1s e 10s).
```

```
for i=1:3
    Icc_ac(i)=sqrt(((Sc^2)/(tac(i))*115679*log10((T2+234)/(T1+234))));
end
```

```
%A.2.5 - Rotina para elaboração do Gráfico da Curva de Dano (Curva ANSI) do
Transformador de Potência TR-1/2/5 (500kVA)
Tansi_tr_catI=[2 10 30 60 100]; %Informações de Tempos(s) e Corrente(A) das
curvas de dano dos transformadores a SECO - CAT I [15 a 500kVA]
Icc_ansi_tr_catI=[25 11.18 6.45 4.56 3.54]*In; % Conforme IEEE Std
C57.12.59-2015-IEEE Guide for Dry-Type Transformer Through-Fault Current
Duration
Icc_ansi_tr_Des_catI=0.58*Icc_ansi_tr_catI; % Curva de Dano Deslocada para
conexão Delta-Estrela aterrada (Dy1);
```

```
figure (1)
loglog(c_rs1,t_rs1,'r',c_rs2,t_rs2,'--r',c_rs3,t_rs3,'k',Icc_ac,tac,'--
k','linewidth',[1.2]);
xlabel('CORRENTE [A] - TENSÃO REFERÊNCIA-13,8 kV');
ylabel('TEMPO [seg]');
title('COORDENOGRAMA DE FASE')
legend('RS-1:ALIMENTADOR CONCESSIONÁRIA','RS-2: PROT. ENTRADA CLIENTE','RS-
3: PROT. TRANSF. TR-1/2/3','CURVA DE DANO CABO 50mm2-12/20kV-XLPE')
xlim([10,10000]);
ylim([0.01,1000]);

grid
hold on
loglog(Icc_ansi_tr_catI,Tansi_tr_catI,'--
b',Icc_ansi_tr_Des_catI,Tansi_tr_catI,'b','linewidth',[1.2]);
plot(Iinrush,Tinrush,'o--','linewidth',[1.2]);
legend('RS-1:ALIMENTADOR CONCESSIONÁRIA','RS-2: PROT. ENTRADA CLIENTE','RS-
3: PROT. TRANSF. TR-1/2/3','CURVA DE DANO CABO 50mm2-12/20kV-XLPE','CURVA DE
DANO TR-1/2/3(500KVA)','CURVA DE DANO-DESLOCADA TR-1/2/3(500KVA)','INRUSH
TR-1/2/3(500kVA)');
```

```
figure (2)
loglog(cn_rs1,tn_rs1,'b',cn_rs2,tn_rs2,'--
r',cn_rs3,tn_rs3,'k','linewidth',[1.2]);
xlabel('CORRENTE [A] - TENSÃO REFERÊNCIA-13,8 kV');
ylabel('TEMPO [seg]');
title('COORDENOGRAMA DE NEUTRO')
legend('RS-1:ALIMENTADOR CONCESSIONÁRIA','RS-2: PROT. ENTRADA CLIENTE','RS-
3: PROT. TRANSF. TR-1/2/3')
xlim([1,10000]);
ylim([0.01,100]);
grid
```