



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATHEUS ALENCAR DA ROCHA LIMA

**ESTUDO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO
SISTEMA DE PROTEÇÃO DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS DO PICI
UTILIZANDO O SOFTWARE ATPDRAW**

FORTALEZA

2019

MATHEUS ALENCAR DA ROCHA LIMA

ESTUDO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA
DE PROTEÇÃO DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS DO PICI UTILIZANDO O
SOFTWARE ATPDRAW

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L699e Lima, Matheus Alencar da Rocha.
Estudo dos impactos da inserção de geração distribuída no sistema de proteção da rede elétrica do Campus do Pici utilizando o software ATPDraw / Matheus Alencar da Rocha Lima. – 2019.
127 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.
1. ATPDraw. 2. Geração distribuída. 3. Impactos da geração distribuída. 4. Simulação. 5. Rede de distribuição do Campus do Pici. I. Título.

CDD 621.3

MATHEUS ALENCAR DA ROCHA LIMA

ESTUDO DOS IMPACTOS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA
DE PROTEÇÃO DA REDE ELÉTRICA DO CAMPUS DO PICI UTILIZANDO O
SOFTWARE ATPDRAW

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Fellipe Souto Soares
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. MSc. Carlos Gustavo Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Primeiramente Deus.

A minha mãe, Maria Apolônia.

A minha namorada, Adryelly.

Aos meus colegas de curso, família, amigos e todos os que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado forças e perseverança para alcançar meus objetivos durante toda a minha vida. Tenho a plena convicção de que Deus sempre esteve presente me ouvindo, me auxiliando e mostrando o caminho para conseguir alcançar meus objetivos. Se hoje estou me formando, com certeza é porque Ele permitiu que eu tivesse capacidade para tanto.

A minha mãe, Maria Apolônia, por todo apoio, esforço e dedicação na minha formação humana, a pessoa que sempre esteve do lado e sempre me deu força quando mais precisei. Sempre me educou e fez de tudo para que eu me tornasse a melhor pessoa que eu poderia me tornar, se hoje estou onde estou, com certeza é por causa dessa mulher maravilhosa.

A minha namorada, Adryelly Soares, por sempre estar do meu lado, me apoiar e me aconselhar em toda a minha jornada.

Ao meu irmão, Mathias Alencar, por ter passado toda a jornada dos nossos cursos do meu lado, me ajudando e compartilhando as mesmas vivências, além de sempre me apoiar e me aconselhar em todas minhas decisões.

A toda minha família como um todo, em especial meu irmão Francisco Carlos e minha irmã Ana Célia, que sempre me ajudaram em todos os sentidos não somente durante todo período da minha graduação, mas em toda a minha vida.

Ao meu sobrinho Carlos Eduardo, pelos momentos de brincadeiras e sorrisos compartilhados, além de também um dos motivos pelo qual me fizeram não desistir dos meus sonhos e sempre continuar lutando.

A todos meus professores do Ensino Médio, que sempre acreditaram em mim e me ajudaram a entrar na universidade, em especial a professora Joseane e ao professor Temilson, que tiveram um papel fundamental no meu ingresso na universidade.

Ao Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio, pela excelente orientação, pelo tempo que disponibilizou para nossas reuniões e toda a ajuda dada para o meu trabalho.

Aos participantes da banca examinadora Carlos Gustavo Castelo Branco e Fellipe Souto Soares pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus colegas da turma de graduação, em especial ao grupo chamado AGUFC composto por Bruno Gomes, Caio Nobre, José Airton, Leonardo Andrade, Matheus Torres, Pedro Tino e Vanderson Ribeiro, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas, além de todos os momentos bons e ruins compartilhados, independente de todos os resultados, sempre estivemos juntos para vencer essa jornada.

Aos meus colegas Fernando Vasconcelos e Leonardo Milfont, por absolutamente todas as vezes em que eu pedi ajuda, se mostraram dispostos e reservaram um pouco de seu tempo para a me ajudar.

A universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Elétrica, por proporcionar a conclusão do meu curso.

A todos os professores da minha graduação, que durante este período sempre me ajudaram e tiraram minhas dúvidas.

“No fim tudo dá certo, e se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim.”

(Fernando Sabino)

“Algumas pessoas sonham com o sucesso, outras levantam cedo e batalham para alcançá-lo.”

(Eike Batista)

“Se você só fizer o que sabe, nunca vai ser nada além do que já é.”

(Mestre Shifu)

RESUMO

Existe uma necessidade crescente da sociedade de fornecimento de energia confiável, segura e de qualidade. Novas soluções e evoluções, como a inserção de geração distribuída em um sistema elétrico são originados fatores como impactos ambientais, surgimento de novas tecnologias e o aumento da demanda de energia. Este trabalho, a partir de simulações utilizando o software ATPDraw, realiza uma análise efeitos e impactos da inserção de gerações distribuídas na rede de distribuição do Campus do Pici. Este estudo faz-se necessário pois as gerações distribuídas causam impactos no sistema elétrico que podem vir a ocasionar um mal funcionamento nas proteções deste sistema, por exemplo, nos relés de proteção de sobrecorrente temporizados. Neste trabalho foram modelados os relés de proteção de sobrecorrente temporizada com ajuste instantâneo, disjuntor trifásico, fonte de tensão, linha de distribuição, transformador de potencial, cargas, amperímetros, geração distribuída proveniente de uma máquina síncrona, geração solar fotovoltaica e o curto-circuito trifásico. Através do ATPDraw, onde foi modelado a rede elétrica da UFC - Campus do Pici, foram executadas simulações, sem e com a presença de geração distribuída, analisando os efeitos realizados pela inserção destas fontes. Este trabalho também permite mostrar que o ATPDraw é uma ferramenta útil para a execução de estudos no ambiente acadêmico, a fim de aumentar o aprendizado dos estudantes em áreas como proteção de sistemas elétricos de potência. As simulações feitas neste trabalho mostram que as gerações distribuídas alteram o comportamento da forma de onda das correntes de cada alimentador de distribuição, aumentam o nível de curto-circuito de cada trecho e descoordenam as proteções dos mesmos.

Palavras-chave: ATPDraw. Geração Distribuída. Impactos da Geração Distribuída. Simulação. Rede de distribuição do Campus do Pici.

ABSTRACT

There is a growing need from society for reliable, safe and quality power supply. New solutions and evolutions, such as the insertion of distributed generation in an electrical system, are caused by factors such as environmental impacts, the emergence of new technologies and the increase in energy demand. This work, from simulations using the ATPDraw software, performs an analysis effects and impacts of the insertion of distributed generations in the distribution network of the Campus do Pici. This study is necessary because the distributed generations cause impacts on the electrical system that can cause a malfunction in the protections of this system, for example, in the timed overcurrent protection relays. In this work, the time delayed overcurrent protection relays with instantaneous adjustment, three-phase circuit breaker, voltage source, distribution line, potential transformer, loads, ammeters, distributed generation from a synchronous machine, photovoltaic solar generation and three-phase short circuit were modeled. Through ATPDraw, where the UFC - Campus do Pici electric network was modeled, simulations were performed, without and with the presence of distributed generation, analyzing the effects realized by the insertion of these sources. This work also shows that ATPDraw is a useful tool for the execution of studies in the academic environment, in order to increase the learning of students in areas such as protection of electrical power systems. The simulations made in this work show that the distributed generations change the behavior of the waveform of the currents of each distribution feeder, increase the level of short-circuit of each section and uncoordinate the protections of the same.

Keywords: ATPDraw. Distributed Generation. Impacts of Distributed Generation. Simulation. distribution network of the Campus do Pici.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Distribuição de Média Tensão	22
Figura 2 – Rede Radial em Situação de Contingência	23
Figura 3 – Rede Radial com Recurso em Situação de Contingência	24
Figura 4 – Decomposição de sistema desequilibrado em componentes simétricas.	27
Figura 5 – Divisão de um sistema elétrico de potência em zonas de proteção.....	31
Figura 6 – Curva de tempo definido.....	32
Figura 7 - Curva de tempo inverso.	33
Figura 8 – Curvas de tempo inverso.....	34
Figura 9 – Influência do Dial de tempo nas curvas de tempo inverso.....	35
Figura 10 – Área de trabalho do ATPDraw	42
Figura 11 – Escolha dos componentes a serem adicionados no circuito elétrico do ATPDraw	42
Figura 12 – Componentes adicionados na área de trabalho do ATPDraw.....	43
Figura 13 – Componentes do circuito interligados.....	44
Figura 14 – Caixa de diálogo do ATPDraw para especificação dos parâmetros da fonte de tensão.....	45
Figura 15 – Caixa de diálogo do ATPDraw para especificação dos parâmetros do resistor ...	45
Figura 16 – Circuito RLC no ATPDraw com os parâmetros de todos os elementos do circuito definidos	46
Figura 17 - Sistema elétrico de média tensão de distribuição do Campus do Pici	48
Figura 18 – Etapas para criação de um “models” no ATPDraw	49
Figura 19 – Passos para criação de um arquivo .sup	49
Figura 20 – Janela de diálogo do ATPDraw para criação de um arquivo .sup	50
Figura 21 – Janela de diálogo do ATPDraw para criação de um arquivo .sup sinalizando as opções citadas.....	51

Figura 22 – Janela de diálogo do ATPDraw para criação de um arquivo .sup	52
Figura 23 – Passos para criação de um arquivo .mod	52
Figura 24 – Janela de diálogo do ATPDraw para criação de um arquivo .mod.....	53
Figura 25 – Arquivos .sup e .mod criados para implementação do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.....	54
Figura 26 – Componente do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.	54
Figura 27 – Janela de diálogo do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.	56
Figura 28 – Fluxograma da lógica de programação do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.....	58
Figura 29 - Chaves utilizadas para a modelagem do disjuntor no ATPDraw	59
Figura 30 - Fonte de tensão no ATPDraw.....	59
Figura 31 - Parâmetros da fonte de tensão	60
Figura 32 - Linha de Distribuição modelada no ATPDraw	60
Figura 33 - Parâmetros da Linha de Distribuição.....	61
Figura 34 - Modelo de transformador trifásico saturável no ATPDraw	62
Figura 35 - Parâmetros do transformador.....	63
Figura 36 - Modelagem das cargas no ATPDraw	63
Figura 37 – Modelagem do Amperímetro no ATPDraw.....	64
Figura 38 - Modelagem do amperímetro de valor eficaz no ATPDraw.....	64
Figura 39 - Modelo de geração distribuída para PCH no ATPDraw	65
Figura 40 - Modelagem da geração solar fotovoltaica no ATPDraw	66
Figura 41 - Modelagem do curto-circuito trifásico no ATPDraw.....	66
Figura 42 - Modelagem do DLCC no ATPDraw.....	67
Figura 43 - Rede de Média Tensão do Campus do Pici modelada no ATPDraw	69
Figura 44 - Alimentador da SED do Campus do Pici com a inserção do DLCC.....	77

Figura 45 – Corrente eficaz de (a) carga e de (b) curto-circuito entre os barramentos 7995 e 9784	777
Figura 46 - Correntes de carga e de curto-circuito eficazes no lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici.....	79
Figura 47 - Corrente curto-circuito no lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici.....	81
Figura 48 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito eficazes no lado de baixa tensão do transformador da SED do Campus do Pici.....	82
Figura 49 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito eficazes no Trecho A	844
Figura 50 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito eficazes no Trecho C	87
Figura 51 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito eficazes no Trecho D	89
Figura 52 - Rede de Média Tensão do Campus do Pici modelada no ATPDraw com todos os relés de proteção	944
Figura 53 - Correntes de fase do Trecho D.....	955
Figura 54 - Zoom no instante de tempo em que o relé de proteção atua.....	966
Figura 55 - Correntes de fase do Trecho A.....	977
Figura 56 - Zoom no instante de tempo em que o relé de proteção atua.....	98
Figura 57 - Rede de Média Tensão do Campus do Pici modelada no ATPDraw com a inserção das Gerações Distribuídas	1011
Figura 58 - Correntes de fase do Trecho D.....	1022
Figura 59 - Zoom no instante de tempo em que o relé de proteção atua.....	1033
Figura 60 - Correntes de fase no Trecho A.....	1044
Figura 61 - Zoom no instante de tempo em que o relé de proteção atua.....	1055

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos coeficientes α e β da curva de tempo inverso.....	34
Tabela 2 - Valor a ser inserido para a curva escolhida.....	55
Tabela 3 - Dados dos trechos da linha de distribuição da rede do Pici.....	61
Tabela 4 - Dados da Máquina Síncrona da Geração Distribuída.....	65
Tabela 5 - Valores de correntes de carga e de curto-circuito de cada trecho.....	68
Tabela 6 - Dados da parametrização dos relés de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici.....	92
Tabela 7 - Tempo de Operação e Margens de tempo dos relés de proteção.....	99
Tabela 8 - Tempo de Operação e Margens de tempo dos relés de proteção.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
AT	Alta Tensão
ATP	Alternative Transients Program
DLCC	Dispositivos Limitadores de Corrente de Cirto-circuito
FS	Fator de Segurança
GD	Geração Distribuída
OAP	Ordem de Ajuste de Proteção
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
RTC	Relação de transformação do Transformador de Corrente
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SED	Subestações de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1.	Descrição da problemática e justificativa	19
1.2.	Objetivos	19
1.2.1.	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>19</i>
1.2.2.	<i>Objetivo específico.....</i>	<i>20</i>
1.3.	Estrutura do trabalho	20
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1.	Introdução	21
2.2.	Sistema elétrico de potência	21
2.3.	Sistema de distribuição de energia elétrica.....	21
2.4.	Geração distribuída.....	24
2.5.	Curto-circuito	25
2.5.1.	<i>Curto-circuito simétrico</i>	<i>26</i>
2.5.2.	<i>Curto-circuito assimétrico.....</i>	<i>26</i>
2.5.3.	<i>Tipos de curto-circuito assimétricos</i>	<i>28</i>
2.6.	Contribuições da geração distribuída para correntes de falta.....	28
2.7.	Proteção de sistemas elétricos de potência	29
2.7.1.	<i>Filosofia de proteção.....</i>	<i>29</i>
2.7.2.	<i>Zonas e níveis de proteção</i>	<i>30</i>
2.7.3.	<i>Relés de proteção de sobrecorrente.....</i>	<i>31</i>
2.8.	Dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito	35
2.9.	Conclusão do capítulo	37
3.	FERRAMENTA E METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	38
3.1.	Introdução	38
3.2.	Ferramenta ATPDraw	38
3.2.1.	<i>Contexto histórico.....</i>	<i>38</i>
3.2.2.	<i>Sobre o ATPDraw.....</i>	<i>39</i>
3.2.3.	<i>Conhecendo o ATPDraw.....</i>	<i>41</i>
3.3.	Modelagem do alimentador de distribuição	47
3.3.1.	<i>Considerações iniciais.....</i>	<i>47</i>

3.3.2.	<i>Características da Rede elétrica do Campus do Pici da UFC.....</i>	47
3.3.3.	<i>Criação de um componente no ATPDraw</i>	48
3.3.4.	<i>Modelagem dos componentes utilizados nas simulações deste trabalho.....</i>	54
3.3.5.	<i>Modelagem do sistema elétrico do Campus do Pici no ATP.....</i>	67
3.4.	Procedimento para cálculo dos ajustes dos relés de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.....	70
3.4.1.	<i>Considerações iniciais.....</i>	70
3.4.2.	<i>Escolha do Transformador de Corrente e cálculo do RTC</i>	70
3.4.3.	<i>Cálculo da corrente de ajuste da função 51 (temporizada)</i>	70
3.4.4.	<i>Cálculo da corrente de Pick-up e do Múltiplo da função 51.....</i>	71
3.4.5.	<i>Cálculo do tempo de operação do relé de proteção contra sobrecorrente temporizado.....</i>	71
3.4.6.	<i>Dial de tempo e tempo de operação da função 51 (temporizada).....</i>	72
3.4.7.	<i>Cálculo da corrente de ajuste da função 50 (instantânea)</i>	72
3.5.	Conclusão do capítulo	72
4.	SIMULAÇÕES E RESULTADOS DO ESTUDO NO ATP	74
4.1.	Introdução.....	74
4.2.	Cálculo dos ajustes dos relés de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo do sistema elétrico de média tensão de distribuição do campus do Pici.....	74
4.2.1.	<i>Considerações iniciais.....</i>	74
4.2.2.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente da SED do Pici da Enel.....</i>	75
4.2.3.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente do transformador do Campus do Pici.....</i>	78
4.2.4.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho A.....</i>	83
4.2.5.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho B.....</i>	86
4.2.6.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho C.....</i>	86
4.2.7.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho D.....</i>	88
4.2.8.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente dos Trecho E</i>	90
4.2.9.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho F.....</i>	90
4.2.10.	<i>Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho G.....</i>	91
4.2.11.	<i>Considerações finais.....</i>	91
4.3.	Simulação do curto-circuito trifásico no sistema de distribuição de média tensão do Campus do Pici com todos os relés de proteção parametrizados e sem geração distribuída inserida na rede	92

4.3.1.	<i>Considerações iniciais</i>	92
4.3.2.	<i>Rede do Pici com todos os relés de proteção parametrizados</i>	93
4.3.3.	<i>Simulação da falha no barramento D</i>	95
4.3.4.	<i>Simulação da falha em todos os barramentos</i>	99
4.4.	Simulação do curto-circuito trifásico no sistema de distribuição de média tensão do Campus do Pici com todos os relés de proteção parametrizados e com geração distribuída inserida na rede	99
4.4.1.	<i>Considerações iniciais</i>	99
4.4.2.	<i>Rede do Pici com a inserção das Gerações Distribuídas</i>	100
4.4.3.	<i>Simulação da falha no barramento D</i>	102
4.4.4.	<i>Simulação da falha em todos os barramentos</i>	106
4.5.	Conclusões do capítulo	107
5.	CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTO FUTURO	108
5.1.	Conclusão	108
5.2.	Trabalhos futuros	109
	REFERÊNCIAS	110
	APÊNDICE A – EXEMPLO DE SIMULAÇÃO NO ATPDRAW	113
	APÊNDICE B – PARÂMETROS E AJUSTES DOS RELÉS DE PROTEÇÃO MODELADOS NO ATPDRAW	119
	ANEXO A – CÓDIGO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADO COM AJUSTE DE INSTANTÂNEO (FUNÇÃO 50/51)	123

1. INTRODUÇÃO

1.1. Descrição da problemática e justificativa

Impactos ambientais, elevado montante financeiro e disponibilidade de grandes quedas d'água são um dos grandes empecilhos encontrados para a elaboração de projetos e até mesmo a construção de usinas hidrelétricas, o que acarreta em uma dificuldade cada vez maior de se concretizar esse tipo de empreendimento. A Geração Distribuída (GD) nasce nesse contexto como uma concepção de produção de energia. Suas características particulares permitem contribuir de forma positiva para a resolução destes e de demais problemas encontrados nos sistemas elétricos de potência. Em comparação com grandes usinas hidrelétricas, estes tipos de gerações distribuídas causam menos impactos no meio ambiente, além de ter um processo de construção mais acelerado e utilizam-se linhas de transmissão mais curtas para atender aos centros de consumo (ZILLES *et al.*, 2012).

Toda via, tais fontes de energias renováveis se apresentam intermitentes e com variação de produção durante o dia, ou seja, seu funcionamento constante ao longo do dia não é totalmente garantido, isso leva a GD ser considerada como uma fonte de energia complementar (ZILLES *et al.*, 2012).

Portanto, para se poder considerar a GD como participante do planejamento da expansão do setor energético brasileiro faz-se necessário estudar, conhecer e entender os impactos que a mesma pode vir a provocar no sistema elétrico em que elas serão inseridas, para que a inserção das GDs seja feita de forma que se possa aproveitar ao máximo suas vantagens, e ainda, tomar atitudes preventivas contra seus efeitos negativos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar a modelagem, simulação e resultados do comportamento do sistema elétrico do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC) com e sem geração distribuída.

1.2.2. Objetivo específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Modelar e simulara rede elétrica do Campus do Pici com e sem geração distribuída no ATP;
- Modelar e simular o sistema de proteção da rede elétrica do Campus do Pici no ATP;
- Analisar e comparar os resultados da atuação do sistema de proteção do sistema elétrico com Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará com e sem GD.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em 5 capítulos, conforme apresentado a seguir.

No capítulo 1 é apresentada a descrição da problemática proporcionada pela expansão das GD, a justificativa, motivação e objetivos desse trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica usada como base para o entendimento deste trabalho, com ênfase nos conceitos e fundamentos relacionados a sistemas elétricos de potência estudos elétricos de curto-circuito e os impactos da geração distribuída nas correntes de falta e nos sistemas de proteção.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho, apresentado a ferramenta de modelagem e simulação, a modelagem de todo o sistema elétrico da rede do Pici e os procedimentos utilizados para o cálculo dos ajustes e parâmetros dos relés de proteção de sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo.

No capítulo 4 são apresentados os ajustes calculados de todos os relés de proteção utilizados na modelagem, a simulação da rede do Pici antes da inserção da GD e após a inserção da mesma, e por fim, mostra-se as conclusões aferidas destas simulações referentes aos impactos que a inserção da GD provoca no sistema elétrico de potência da rede do Campus do Pici.

No capítulo 5 é apresentado a conclusão com ênfase nas avaliações dos resultados abiscoitados das simulações feitas no capítulo 4.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução

Este capítulo aborda sobre os conceitos e fundamentos relacionados ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), à Geração Distribuída (GD), teoria sobre Curto-Circuito e suas contribuições para as correntes de falta e sistemas de proteção.

2.2. Sistema elétrico de potência

O SEP constitui-se por um conjunto de elementos elétricos, sendo estes principalmente as subestações de transformação, as centrais elétricas, os receptores e as linhas, todos estes interligados uns aos outros. Este sistema engloba desde a geração de energia elétrica até a distribuição da mesma, onde entres estes, existe a transmissão de energia elétrica (MATIAS, 1990).

2.3. Sistema de distribuição de energia elétrica

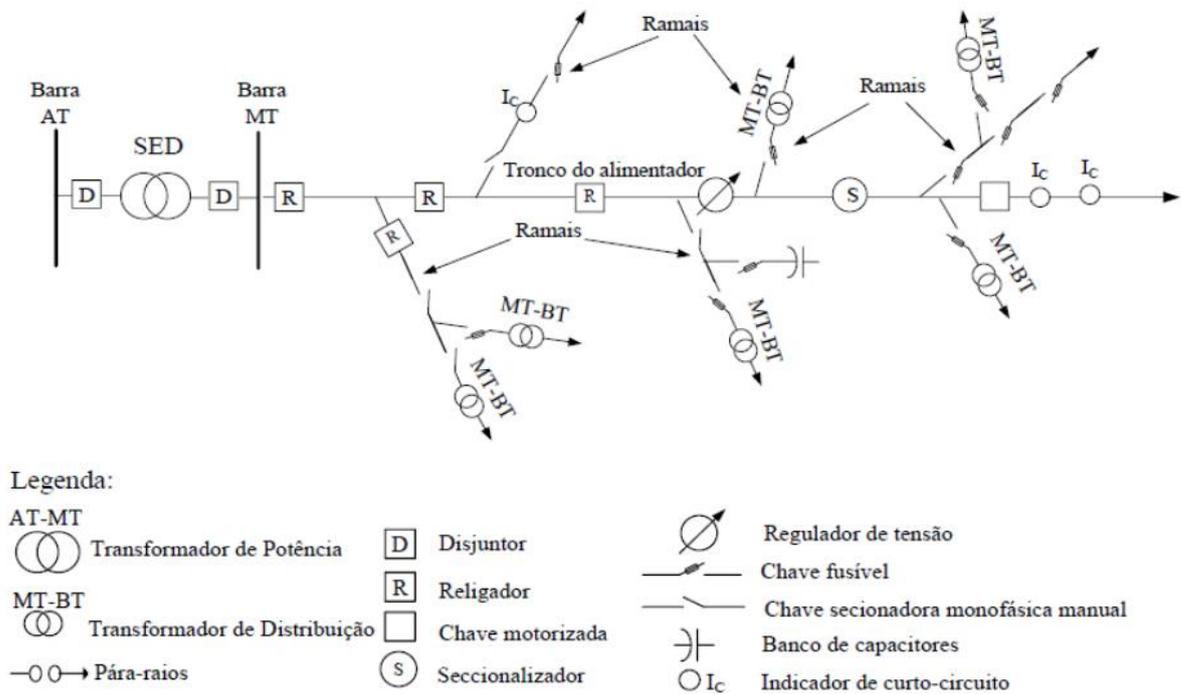
Este sistema tem sua origem nas Subestações de Distribuição (SED), onde normalmente tem sua alimentação provida de uma ou mais linhas de distribuição de Alta Tensão (AT). A alimentação dos transformadores da rede de média tensão é provida dos circuitos de distribuição que saem das SED.

Os circuitos elétricos do sistema de distribuição de energia elétrica são normalmente radiais, salvo apenas algumas exceções, logo, o mesmo possui um sentido único, em direção aos consumidores e partindo das SED (KERSTING, 2012).

É mostrado na Figura 1 o diagrama básico de um sistema elétrico de distribuição de energia elétrica. Pode-se observar nesta figura o SED citado anteriormente, situado entre duas barras com potenciais diferentes. É visto, ainda, alguns elementos como transformadores

de potência, barras, disjuntores, religadores, alimentadores, transformadores de distribuição, chaves motorizadas, seccionalizadores, chaves fusíveis, banco de capacitores, etc.

Figura 1 – Sistema de Distribuição de Média Tensão

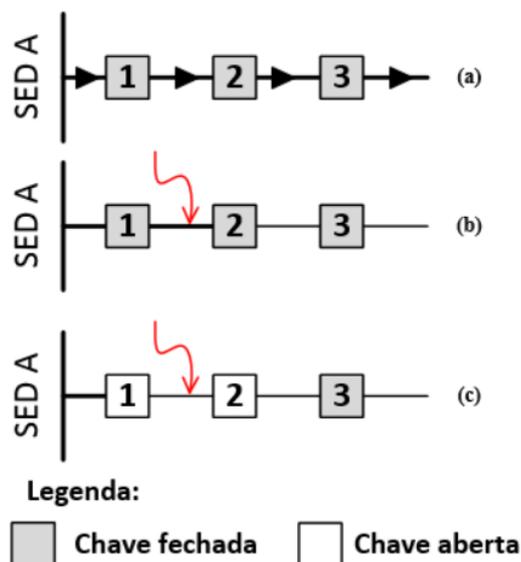


Fonte: Sampaio, R (2017).

O fluxo de carga, no Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT), possui uma característica unidirecional, isso implica em uma baixa confiabilidade em sua topologia radial, pois em uma situação em que se queira desenergizar algum trecho do sistema, para reparos e manutenções por exemplo, todos os outros trechos a jusante deste ficariam sem alimentação (BARBOSA, 2017).

É observado na Figura 2 um exemplo de um sistema radial, onde pode-se notar que, ao se ter uma falha entre as chaves 1 e 2, as mesmas são abertas e a chave 3 é desenergizada, ratificando a baixa confiabilidade supracitada.

Figura 2 – Rede Radial em Situação de Contingência



Fonte: Sampaio, F (2017).

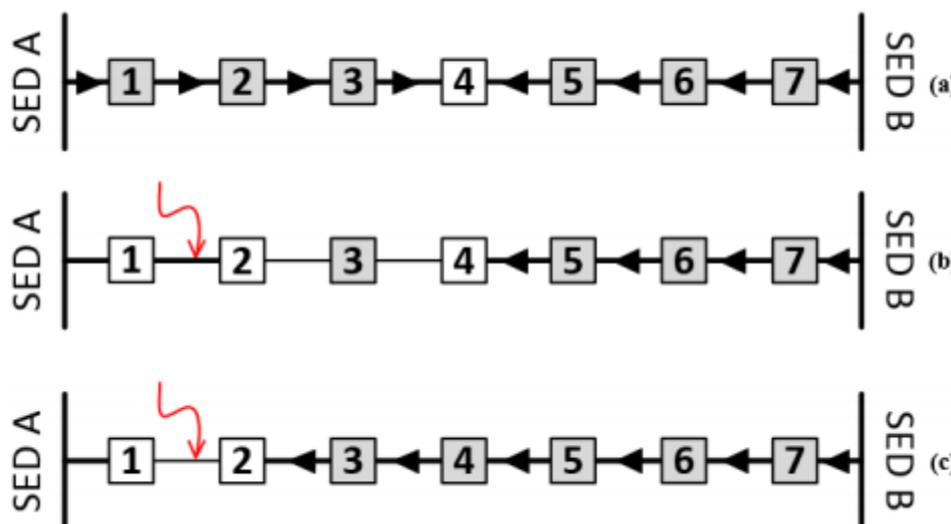
Devido a esta baixa confiabilidade no sistema, os órgãos reguladores de energia elétrica aumentaram suas cobranças por melhorias na confiabilidade e qualidade da energia elétrica (SAMPAIO, R., 2017). Uma solução adotada pelas concessionárias foi, então, instalar chaves de encontro de alimentadores nos SDMT's, essa instalação transforma a topologia do sistema, onde antes o mesmo era do tipo radial, e passa a ser radial com recurso (SAMPAIO, F., 2017).

Em redes com esse novo tipo de topologia, os trechos que antes eram desenergizados devido a falhas nos elementos a montante dos mesmos, passam a poder ser energizados novamente após o isolamento da falha, o que implica no aumento da confiabilidade do sistema de distribuição além de haver uma melhora na qualidade de energia elétrica que será fornecida aos consumidores, visto que essa estratégia também possibilita a diminuição do número de consumidores desenergizados durante uma contingência.

É mostrado na Figura 3 um exemplo do sistema radial com recurso supracitado, onde pode-se observar uma chave que é do tipo normalmente aberta que está localizada entre os alimentadores, por isso o nome chave de encontro. Na Figura 3(a) a chave 4 está aberta e tem-se o sistema funcionando normalmente, mas ao se ocorrer uma falha entre as chaves 1 e 2, como mostrado na Figura 3(b), em que numa situação onde se tinha um sistema puramente radial a chave 3 deixaria de ser energizada, tem-se uma alimentação provida da SED B, pois a

chave 4 é fechada permitindo assim que o trecho entre as chaves 2 e 3 seja energizado novamente.

Figura 3 – Rede Radial com Recurso em Situação de Contingência



Fonte: Sampaio, F. (2017).

2.4. Geração distribuída

Em um sistema de distribuição convencional existe unidades de geração de energia elétrica, normalmente de grande porte, e principalmente localizadas em locais muito distantes dos consumidores (centros de carga). Por outro lado, podem haver pequenas unidades geradoras de energia elétrica, principalmente próximas dos consumidores, caracterizando-se, assim, uma GD (COLMENAR-SANTOS *et al.*, 2016).

Existem diferentes tipos de classificações de GD, em que estas classificações são baseadas na potência instalada de cada uma, podendo serem divididas então, em micro e minigeração distribuída. A primeira se trata das centrais geradoras de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW, em que estas fazem a utilização da cogeração qualificada, de acordo com a regulamentação exigida pela Agência Nacional de Engenharia Elétrica (ANEEL), além de outras formas de geração de energia elétrica que utilizem meios renováveis, que são conectados à rede de distribuição por meio das instalações feitas pelas unidades consumidoras (REN N° 687, 2015). Já a segunda, possui as mesmas características da primeira, mas tem sua potência instalada superior a 75 kW e menor que 5 MW (REN 786, 2017).

Além da divisão em micro e minigeração distribuída, a GD também pode ser classificada em GD baseada em inversor e GD não baseada em inversor. A exemplo da primeira classificação tem-se os sistemas fotovoltaicos, células de carga e geradores eólicos, e a exemplo da segunda tem-se os geradores síncronos das pequenas centrais hidrelétricas e os geradores de indução eólicos (KELLER; KROPOSKI, 2010).

A GD tem crescido rapidamente ao longo dos anos, principalmente devido às suas vantagens técnicas, econômicas e ambientais, em que se tem que a vantagens ambientais se tratam do uso de recursos providos de energias renováveis (SAMPAIO, F., 2017).

Segundo Colmenar-Santos *et al.* (2016) as principais vantagens técnicas, econômicas e ambientais são:

- **Técnica**

Redução de perdas de energia, melhoria no perfil de tensão da rede elétrica, melhora na qualidade da energia elétrica, melhora na eficiência energética e melhora na confiabilidade do sistema.

- **Econômica**

Redução de custos operativos, redução de custos de capital, redução de custos ambientais, além das reduções das tarifas de consumo de energia elétrica.

- **Ambiental**

Redução de consumo de combustíveis fósseis e redução de emissão de gases do efeito estufa.

Mesmo diante de tantas vantagens, a GD também apresenta contribuições negativas para o sistema elétrico de distribuição, que podem vir a dificultar manutenções e operações no sistema (SAMPAIO, F., 2017).

2.5. Curto-circuito

O Curto-circuito ocorre quando há um contato entre dois pontos com diferentes níveis de potencial, sendo este contato de baixa impedância. Uma das consequências do curto-circuito é um grande aumento no nível de corrente do circuito, além de ocasionar oscilações de tensão no mesmo, provocando assim, por consequência, vários danos físicos aos elementos de circuito que estão envolvidos, sendo estes, algumas vezes, irreversíveis (MAEZONO, 2015).

Os curtos-circuitos podem acontecer a qualquer hora e de forma imprevisível, devido ao fato de que todo o sistema de potência está normalmente exposto às condições diversas da natureza. Dentre as causas mais prováveis que levam a uma falha, destacam-se problemas na isolação, problemas mecânicos, problemas de natureza térmica, de manutenção, etc. (KINDERMANN, 2010).

As classificações mais comuns dos curtos-circuitos são:

- Curto-circuito trifásico ou simétrico;
- Curto-circuito desequilibrado ou assimétrico.

2.5.1. Curto-circuito simétrico

Este tipo de curto-circuito acontece quando há o contato entre três condutores de fase do circuito do sistema de potência, ficando, assim, os três condutores com potencial igual a zero (MARDEGAN, 2012). Por este se tratar de um curto-circuito simétrico, não entre um curto-circuito trifásico e um curto-circuito trifásico a terra (LOURENÇO, 2018).

A equação que define a corrente de falta é a seguinte:

$$I_{cc3f} = \frac{V}{|Z_1|} \quad (1)$$

Em que:

- V é a tensão do sistema em pu;
- Z_1 é a impedância de sequência positiva vista do ponto de vista do curto-circuito;
- I_{cc3f} é a corrente de curto-circuito trifásico.

2.5.2. Curto-circuito assimétrico

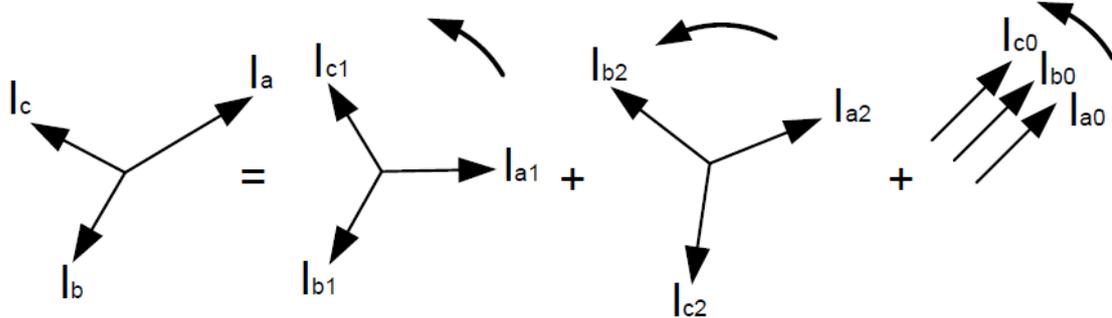
A metodologia de Fortescue é muito utilizada para o estudo de curtos-circuitos, seu método recebe o nome de “Método de componentes simétricas aplicado a circuitos polifásicos”, em que este método estabelece um sistema que contem “n” fasores desequilibrados, que por sua vez, podem ser decompostos em “n” sistemas de fasores equilibrados (KINDERMANN, 2010).

Em um sistema de três fases que estão desequilibradas entre si, inclusive em uma situação de curto-circuito, pode, pelo referido método, ser separado em três sistemas balanceado

que se denominam componentes de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero (LOURENÇO, 2018).

É mostrado na Figura 4 a decomposição do sistema trifásico desequilibrado em um sistema de componentes simétricas.

Figura 4 – Decomposição de sistema desequilibrado em componentes simétricas.



Fonte: ELETROBRÁS (1982)

2.5.2.1 Corrente de sequência positiva

É definido por um conjunto de três fasores que possuem o mesmo módulo, porém, são defasados de 120° entre si, e ainda, a sequência de fase desses fasores é a mesma do sistema original (KINDERMANN, 2010). Por convenção, sua representação é feita pelo índice 1 (LOURENÇO, 2018).

2.5.2.2 Corrente de sequência negativa

Também definido por um conjunto de três fasores, porém, possuem uma sequência de fases contrária à do sistema original, sua representação é feita pelo índice 2 (LOURENÇO, 2018).

2.5.2.3 Corrente de sequência zero

Definido por um conjunto de três fasores que são iguais, tanto em módulo quanto em fase, que giram no mesmo sentido do sistema original, sua representação é feita pelo índice 0 (LOURENÇO, 2018).

2.5.3. Tipos de curto-circuito assimétricos

2.5.3.1 Curto-circuito bifásico

O curto-circuito bifásico é definido pelo contato entre dois condutores fase ou dois condutores fase e a terra. A equação para o cálculo da corrente de curto-circuito proveniente do contato entre duas fases é:

$$I_{cc_{2f}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc_{3f}} \quad (2)$$

Já a equação para o cálculo da corrente de curto-circuito proveniente do contato entre duas fases e a terra é:

$$I_{cc_{2f-T}} = \frac{V}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (3)$$

Em que:

- Z_2 é a impedância de sequência negativa do sistema;
- Z_0 é a impedância de sequência zero do sistema.

2.5.3.2 Curto-circuito fase-terra

Este tipo de curto-circuito é o mais comum em todo o sistema elétrico de potência (KINDERMANN, 2010), e é definido pelo contato entre um dos condutores fase e a terra. No caso de existir uma impedância entre a fase e a terra, proveniente ao tipo de solo ou do aterramento, esse curto-circuito é denominado curto de fase-terra mínimo (LOURENÇO, 2018).

A equação que define o curto-circuito fase-terra é:

$$I_{cc_{1f}} = \frac{3V}{|2 \times Z_1 + Z_0 + 3 \times R_c|} \quad (4)$$

Em que:

- R_c é a resistência de aterramento ou de contato

2.6. Contribuições da geração distribuída para correntes de falta

Um dos pontos negativos para o sistema de distribuição de energia elétrica é a sua contribuição para a corrente de falta.

Essa contribuição é proveniente de diversos fatores, tais como o quanto a GD consegue gerar, sua capacidade total referente ao sistema, a interface de conexão com a rede elétrica, a capacidade de geração relativa a carga do ponto de conexão e o nível de tensão praticado no alimentador da rede (GOMEZ *et al.*, 2013; MASAUD; MISTRY, 2017).

2.7. Proteção de sistemas elétricos de potência

2.7.1. Filosofia de proteção

O sistema de proteção dos sistemas elétricos de potência tem como principal função isolar a área em que ocorreu um problema ou falha de modo a assegurar que o restante do sistema sofra um impacto com efeito reduzido, e se possível, não sofra nenhum dano (SANDERS, 2015).

O sistema de proteção deve proteger os equipamentos e os materiais do sistema elétrico contra os efeitos negativos causados pelos curtos-circuitos e/ou sobrecargas, além de dar uma melhor segurança e confiabilidade aos circuitos de distribuição (NPAG, 2011).

O sistema de proteção possui cinco objetivos básicos, são eles (SANDERS, 2015):

- Confiabilidade;
- Seletividade;
- Velocidade de operação;
- Simplicidade;
- Economia.

2.7.1.1 Confiabilidade

O sistema elétrico de potência possui confiabilidade quando o mesmo consegue garantir seu correto funcionamento, ou seja, consegue atuar corretamente quando se faz necessário e consegue evitar atuações que não são necessárias (SANDERS, 2015).

2.7.1.2 Seletividade

O sistema elétrico de potência possui seletividade quando consegue selecionar de maneira correta os equipamentos que deverão atuar para uma determinada falta. É de suma

importância que a parte do sistema a ser retirada de operação seja a menor possível, para que assim possa-se diminuir inconveniências causadas pela desenergização do sistema (RODRIGUES, 2015).

2.7.1.3 Velocidade de proteção

A velocidade de proteção é um objetivo importante pois o sistema de proteção deve isolar a área com uma falha ou problema o mais rápido possível, garantindo, assim, um sistema contínuo removendo-se cada perturbação em tempo suficiente para garantir que não se tenha uma perda generalizada de sincronismo, e por consequência, no pior dos casos, um colapso no sistema de energia. Mesmo com esse objetivo, deve-se tomar cuidado com o tempo de atuação da proteção, pois quanto mais rápido ela atua, mais chances há de ocorrer uma atuação incorreta, o que provoca uma diminuição na confiabilidade do sistema de proteção (NPAG, 2011).

2.7.1.4 Simplicidade

O sistema elétrico de potência possui simplicidade quando se o mínimo possível de número de equipamentos de proteção e circuitos associados ao sistema de forma que se garanta os objetivos da proteção (SANDERS, 2015).

2.7.1.5 Economia

O sistema elétrico de potência é econômico quando se consegue atingir uma máxima proteção do sistema com um menor custo possível, sendo este fator um dos mais importantes para a escolha da tecnologia de proteção a ser utilizada (LOURENÇO, 2018).

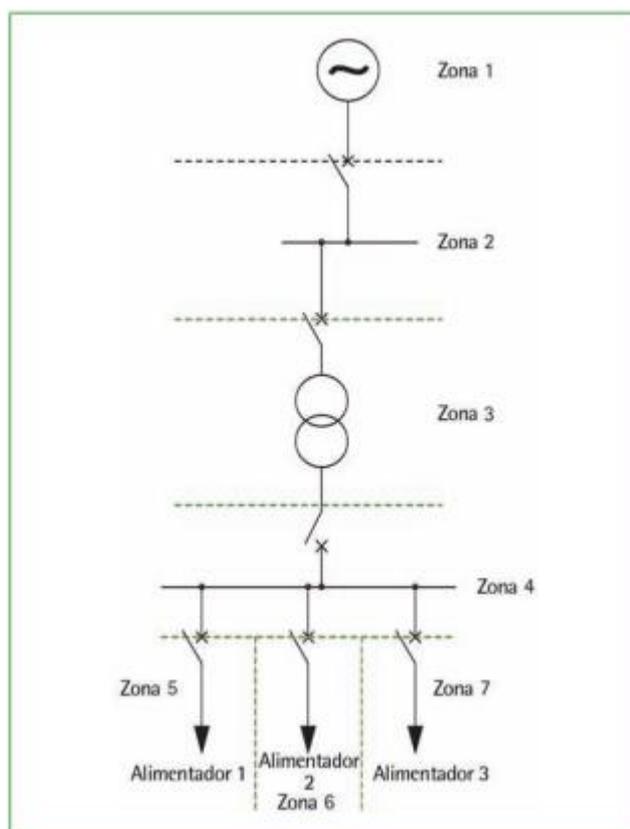
2.7.2. Zonas e níveis de proteção

Zonas de proteção é um conceito dado à região ou área em que a proteção deve atuar. Essas zonas são divididas em zonas de proteção principal, de retaguarda e auxiliar. (NPAG, 2011).

Um sistema elétrico de potência bem protegido tem todas as suas zonas de proteção

bem definidas, o que limita a extensão do sistema de potência ao se ocorrer uma falha, pois esse é desconectado. As zonas de proteção devem ser preferivelmente sobrepostas, isso permite que todo o sistema esteja protegido (RUSH, 2011). Tal conceito de zonas de proteção é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Divisão de um sistema elétrico de potência em zonas de proteção.



Fonte: RUSH (2000).

Dentro de uma zona de proteção, a primeira proteção a atuar deve ser a proteção principal, em segundo plano, caso esta não opere de forma correta, a próxima proteção a atuar deve ser a proteção de retaguarda. Como auxiliaadoras das funções principais e de retaguarda, que podem atuar como sinalizadoras, alarmes, etc. (NPAG, 2011).

2.7.3. Relés de proteção de sobrecorrente

O tipo de proteção utilizada em um sistema elétrico de potência é caracterizado pelo tipo de função de proteção, estas funções de proteção são padronizadas e codificadas pela ANSI.

Para o exemplo de um alimentador de distribuição, as funções de proteção mais

comuns são as funções de sobrecorrente e de religamento, tais funções se resumem basicamente em (LOURENÇO, 2018):

- 50/51: Função de sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51N: Função de sobrecorrente de neutro instantânea e temporizada;
- 46: Função de sobrecorrente de sequência negativa;
- 50BF: Função de falha de disjuntor;
- 79: Função de religamento automático.

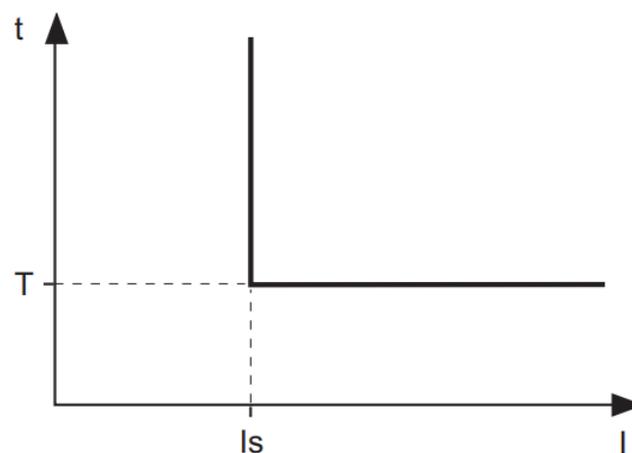
2.7.3.1 Curvas características

Um relé funciona como um dispositivo que sente a falha do circuito do sistema de proteção e comanda o disjuntor para que este possa atuar e desenergizar o circuito, eliminando assim, a falha e seus efeitos negativos.

“O sinal enviado pelo relé para o disjuntor é comumente chamado de sinal de “trip”. As curvas características de um relé de sobrecorrente são de tempo definido e de tempo dependente.” (LOURENÇO, 2018).

A curva de tempo definido define um tempo de atuação do relé para uma corrente de curto-circuito também definida, o relé atua, assim, para valores de correntes de curto-circuito maior que o estabelecido e no tempo de atuação já definido, como observado na Figura 6, onde se percebe que, qualquer que seja o valor da corrente de curto-circuito acima do valor de I_s , o relé irá atuar no obrigatoriamente no tempo definido T , logo, pode-se concluir que para valores de corrente menores que I_s o relé não irá atuar (LOURENÇO, 2018).

Figura 6 – Curva de tempo definido.

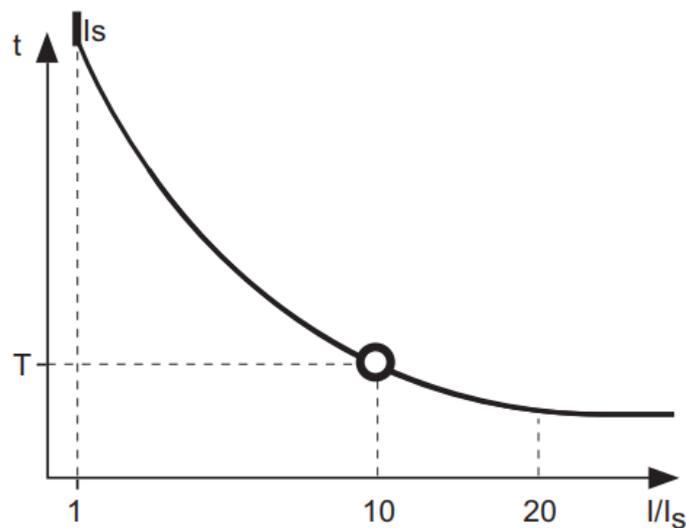


Fonte: SCHNEIDER (2008).

Diante do entendimento desse tipo de curva, pode-se introduzir o conceito de proteção contra sobrecorrente instantânea (50/50N), em que se ajusta essa proteção com um tempo calculado e definido e com uma corrente que é chamada de corrente de ajuste instantâneo do relé. Essa proteção tem a característica de atuar em um intervalo de tempo muito pequeno e para valores de correntes muito altos (LOURENÇO, 2018).

A curva de tempo dependente possui a característica de que a relação entre o tempo de atuação do relé e a corrente de curto-circuito é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior for a corrente de curto-circuito, menor é o tempo de atuação do relé (LOURENÇO, 2018), como mostrado na Figura 7, onde pode-se observar que a medida que o valor da corrente aumenta, diminui-se o valor do tempo de atuação da proteção, o que deixa o sistema mais protegido pois altas correntes precisam ser interrompidas o mais rápido possível, visto que seus valores altos podem causar danos mais graves ao sistema elétrico de potência.

Figura 7 - Curva de tempo inverso.



Fonte: SCHNEIDER (2008).

Outro tipo de curva é a curva de tempo inverso, em que esta pode ser definida como curva normalmente inversa, muito inversa ou extremamente inversa. A equação que define o tempo de atuação do relé para esse tipo de curva é a seguinte (LOURENÇO, 2018):

$$T_{op} = DIAL \cdot \frac{\beta}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick-up}}\right)^\alpha - 1} \quad (5)$$

Em que:

- DIAL é o Dial de tempo;
- α e β são constantes que dependem do tipo da curva;

- $I_{pick-up}$ é a corrente mínima que o relé deve atuar;
- I_{cc} é a corrente de curto-circuito do sistema;
- T_{op} é o tempo de atuação do relé.

α e β possuem valores variados dependendo do tipo de curva adotado, seus valores mais comuns para cada tipo de curva é apresentado na Tabela 1:

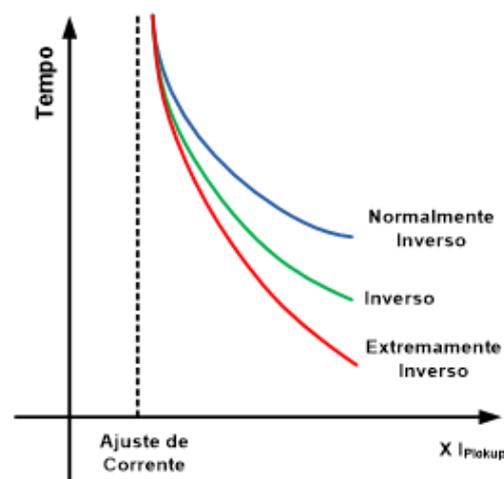
Tabela 1 - Valores dos coeficientes α e β da curva de tempo inverso

Tipo de curva	β	α
Normalmente inversa (NI)	0,14	0,02
Muito inversa (MI)	13,5	1
Extremamente inversa (EI)	80	2

Fonte: LOURENÇO, 2018

É mostrado na Figura 8 as curvas de tempo inverso para os diferentes valores das constantes α e β , onde pode ser visto na que as curvas possuem inclinações diferentes, logo, diferenciando-se o tipo de curva e os valores das constantes pode-se definir qual relé atuará primeiro em determinada falha, introduzindo-se assim o conceito de coordenação.

Figura 8 – Curvas de tempo inverso.



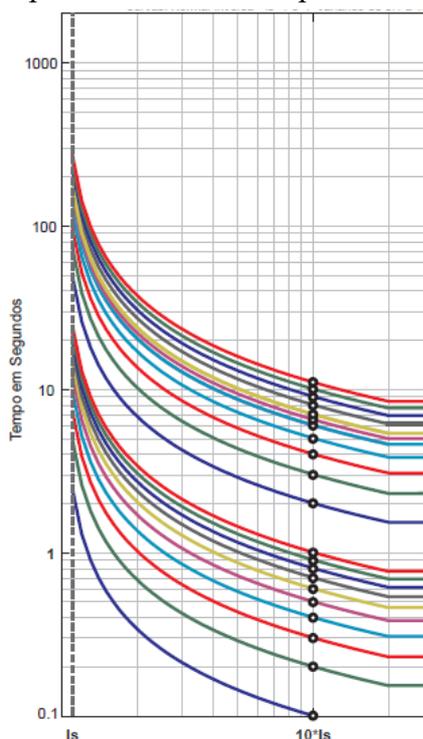
Fonte: RODRIGUES (2015).

Ademais, o Dial, que é definido pelo operador, também serve para a coordenação

dos relés, pois este tem a função de deslocar a curva fazendo assim o relé atuar em um tempo maior ou menor, ficando a escolha a critério do operador (LOURENÇO, 2018).

É observado na Figura 9 a influência da alteração do Dial nas curvas de atuação do relé, ao se determinar um valor específico de corrente, pode-se ter vários tempos de atuação do relé alterando-se apenas o Dial de tempo, ajudando assim na coordenação do sistema de proteção.

Figura 9 – Influência do Dial de tempo nas curvas de tempo inverso.



Fonte: SCHNEIDER (2008)

Essas curvas de tempo inverso estão associadas à função 51 (proteção contra sobrecorrente temporizada) dos relés, ao se integrar as funções 50 e 51 (proteção contra sobrecorrente instantânea e temporizada) tem-se o elemento completo de proteção contra sobrecorrente de um sistema elétrico de potência.

2.8. Dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito

Elevados níveis de curto-circuito no sistema elétrico de potência podem causar superação da capacidade dos equipamentos elétricos, saturação de transformadores de corrente,

descoordenação dos sistemas de proteção entre outros problemas. Diante deste cenário, faz-se necessária a busca por soluções de curto prazo e até mesmo soluções definitivas para esse problema (GODOY, 2009).

Na literatura têm sido propostas para solução desse problema, como: utilização de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-circuito (DLCC) e recapacitação ou substituição dos equipamentos. Dentre essas alternativas, o uso de DLCCs apresenta-se como a solução mais econômica quando comparada as outras alternativas (GODOY, 2009).

Os DLCCs têm a função de limitar as correntes de curto-circuito do sistema elétrico para o nível dos valores nominais dos equipamentos existentes nas instalações. As principais características analisadas para especificação dos DLCCs são (GODOY, 2009):

- Impedância reduzida ou nula para as correntes de carga, em condições normais de operação, de baixas perdas e de baixa queda de tensão;
- Impedância elevada para as correntes de curto-circuito com transição rápida da operação normal para o modo limitador;
- Rápida recuperação para o regime normal de operação, após a interrupção do defeito;
- Elevada confiabilidade e manutenção mínima;
- Custo reduzido.

Os DLCCs podem ser divididos em duas categorias principais: supercondutores e não supercondutores. Os supercondutores são compreendidos pelos reatores série convencionais, ou uma combinação de capacitores e reatores, além de dispositivos eletrônicos de potência com reatores de série convencionais e dispositivos pirotécnicos (GODOY, 2009).

Os reatores limitadores série e os dispositivos pirotécnicos são os mais utilizados no Brasil. Dentre as desvantagens de sua utilização no sistema elétrico de potência pode-se destacar a introdução de perdas e quedas de tensão no sistema (GODOY, 2009).

Para este trabalho adotou-se o DLCC do tipo reator série, para limitar os níveis de curto-circuito elevados no barramento da subestação Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará, responsáveis pela descoordenação das proteções.

A metodologia utilizada neste trabalho para o dimensionamento do DLCC é descrita em (MONTEIRO, 2005).

2.9. Conclusão do capítulo

Esse capítulo apresentou conceitos e definições a respeito do sistema elétrico de potência, do sistema de distribuição de energia elétrica, da geração distribuída e suas contribuições para a corrente de curto-circuito e dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito, necessários para o entendimento dos capítulos a seguir. O entendimento dos conceitos apresentados neste capítulo embasou os procedimentos utilizados para fazer o estudo dos impactos da inserção de Gerações Distribuídas no sistema elétrico de potência do Campus do Pici e facilitou a compreensão das modelagens e análise das simulações feitas no ATPDraw.

3. FERRAMENTA E METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

3.1. Introdução

Este capítulo apresenta a metodologia aplicada para modelagem da rede de distribuição de energia em média tensão de do Campus do Pici da UFC.

A priori apresenta-se o ATPDraw, a ferramenta de modelagem utilizada na modelagem e simulações necessárias para o estudo e análise do sistema das da rede do Campus do Pici da UFC com e sem GD.

Posteriormente modela-se a rede do Pici e mostra-se todo o procedimento para a parametrização de todos os relés de proteção do sistema elétrico do Pici.

Na próxima seção é apresentada a ferramenta de simulação utilizada neste trabalho, inicialmente apresenta-se seu contexto histórico e informações sobre o software, posteriormente é apresentado a interface do programa, como utilizá-lo e quais seus primeiros passos, além disso, mostra-se como se encontra, insere e se parametriza os componentes do ATPDraw.

3.2. Ferramenta ATPDraw

3.2.1. Contexto histórico

O ATPDraw é um software adequado para computador de pequeno porte que permite construir e simular o funcionamento de circuitos elétricos. Sua utilização se dá por meio do uso do mouse, selecionando-se os componentes desejados nos menus (HØIDALEN, 2019).

O ATP teve sua origem no ano de 1984, na época onde nasceu a ideia de se comercializar o programa Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) que foi desenvolvido pela Bonneville Power Administration (BPA). Como o programa EMTP era público, os Drs. W. Scott Meyer e Tsu-huei Liu o usaram como ponto de partida para o desenvolvimento do ATP. Apesar disso, o ATP atualmente não é um software público, sendo requisitado uma licença prévia para sua utilização, diferentemente do programa que eles se basearam para criá-lo (MIGUEL, 2011).

Este programa tem a função de ser um pré-processador para Alternative Transients Program (ATP), muito utilizado para criar e editar arquivos de circuitos elétricos. A saída deste software é um arquivo que pode vir a ser usado como entrada para o programa ATP. Tal

programa foi desenvolvido pelo Dr. Hans Kr. Høidalen, quando estava fazendo sua pesquisa de energia SINTEF, na Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia na Noruega, onde recebeu patrocínio da Bonneville Power Administration, Portlan-Oregon-EUA (HØIDALEN, 2019).

3.2.2. Sobre o ATPDraw

O ATP tem uma grande capacidade para modelar redes polifásicas e simular transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica, em função do uso de matrizes de admitâncias de barras como método base dos cálculos. O ATP conceitua-se matematicamente no método das características, para parâmetros distribuídos, e na regra da integração trapezoidal para parâmetros concentrados (FONSECA; LEAL, 2003).

As integrações trapezoidais são utilizadas no ATP para resolver as equações diferenciais (MIGUEL, 2011). Isso é outro diferencial que faz o ATP um programa muito utilizado, visto que estas equações se fazem muito presentes no estudo de sistemas elétricos no domínio do tempo.

De acordo com Miguel (2011, p. 36),

As condições iniciais são determinadas por uma rotina de solução fasorial do circuito em regime permanente. As perturbações impostas ao sistema podem agregar ser simétricas ou assimétricas. O ATP dispõe de uma interface que permite agregar módulos separados para a simulação de blocos de controle (TACS – *Transient Analysis of Control Systems*) ou elementos com o comportamento não-linear (MODELS).

O ATP é formado por um programa principal para determinação da solução das equações que representam o circuito elétrico no domínio do tempo ou domínio da frequência. Esse programa pode acessar rotinas do suporte que efetuam as seguintes funções:

- Determinação de constantes de linha de transmissão;
- Determinação de constantes de cabos elétricos;
- Modelo Semlyen de linha;
- Parâmetros de cabos elétricos;
- Modelo de transformador:
 - BCTran;
 - XForner;

- Saturação;
- Elementos não lineares:
 - Magnéticos – Saturação;
 - Resistivos – ZnO fitter.

Com mais de 25 anos após seu desenvolvimento, o ATP vem sofrendo permanentes atualizações, dentre as quais se destaca a codificação dos dados de entrada, que antes seguia uma formatação rígida, porém, atualmente segue uma interface gráfica (FONSECA; LEAL, 2003).

Antes de se fazer uma simulação com o ATP, normalmente se utiliza o ATPDraw como passo inicial, com este é possível criar um circuito elétrico do zero apenas selecionando-se os modelos que já são pré-definidos dentro dos principais elementos que compõem uma rede elétrica (FONSECA; LEAL, 2003).

O ATPDraw tem uma flexibilidade muito grande com relação aos circuitos que se deseja simular, por exemplo, ele permite a criação tanto de circuitos monofásico como trifásicos, e mesmo em circuitos trifásicos, essa ferramenta possibilita o uso de diagramas unifilares para facilitar mais o trabalho, dispensando assim a montagem do circuito fase a fase. (FONSECA; LEAL, 2003).

Outra vantagem de destaque do ATPDraw é que esta ferramenta é perfeita para usuários que não possuem muita habilidade em linguagens de programação, além disso, o software oferece uma ajuda online, dispensando, assim, o uso do seu manual (FONSECA; LEAL, 2003).

Apesar de todas as vantagens que esta ferramenta proporciona, existem algumas desvantagens em relação ao uso do ATPDraw, a exemplo disso, há sempre a necessidade de se manter as alterações dos circuitos sempre interno ao ambiente do programa, isso ocorre devido ao fato de que existe uma correspondência entre o arquivo de referência para os dados do circuito, sendo este da forma gráfica, e o arquivo responsável pelo uso de dados utilizado para o ATP. Diante deste fato, em caso de haver uma edição diretamente no arquivo de dados no formato para o ATP, a correspondência entre os dois arquivos (o gráfico e o de dados formatados) é quebrada. Para se contornar este fato não muito agradável é sempre realizar as alterações do circuito ou de dados diretamente no ATPDraw, apesar de esta alteração ser mais lenta comparada à alteração feita diretamente do arquivo de dados (FONSECA; LEAL, 2003).

Os componentes que são normalmente usados no ATP e que são suportados pelo ATPDraw são os seguintes (FONSECA; LEAL, 2003):

- Ramos lineares e não-lineares;

- Modelos de linha;
- Interruptores;
- Fontes;
- Máquinas;
- Transformadores;
- Linhas de transmissão aéreas;
- Objetos especificados pelo usuário.

3.2.3. Conhecendo o ATPDraw

3.2.3.1. Considerações iniciais

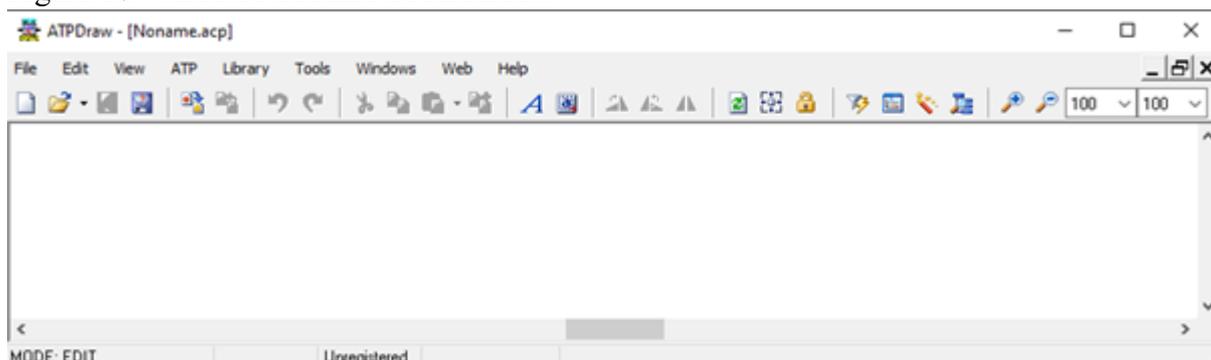
O ATPDraw possui características visuais comuns à um software de simulação de circuitos elétricos, mas, mesmo com tantas similaridades, é necessário um estudo mais aprofundado sobre as funções específicas deste programa (FONSECA; LEAL, 2003).

3.2.3.2. Apresentando o ATPDraw

É mostrado na Figura 10 a área de trabalho do ATPDraw, onde observa-se a linha de comando com algumas funções básicas do programa, como abrir um novo arquivo, salvar o projeto, dar zoom, etc. pode-se observar, ainda, as abas do ATPDraw que permitem executar ações ou edições no programa, dentro da aba “ATP”, por exemplo, o usuário pode executar o programa clicando na função “run ATP”.

É neste ambiente em que o usuário pode construir seu circuito elétrico, e para isso, o mesmo deve primeiramente adicionar os componentes do circuito ao ambiente de simulação, esta ação pode ser executada clicando-se com botão direito do mouse em qualquer ponto da área de trabalho e escolhendo-se quais os componentes adicionar se deseja adicionar.

Figura 10 – Área de trabalho do ATPDraw

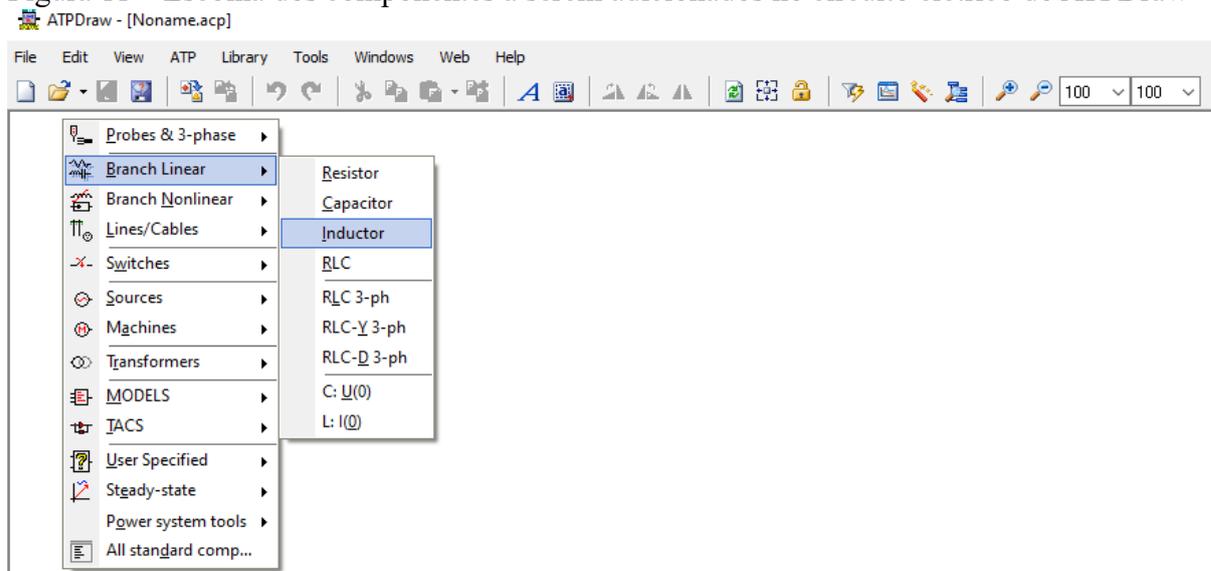


Fonte: O próprio autor (2019)

É observado na Figura 11 a tela do ATPDraw quando se clica com o botão direito em qualquer lugar da área de trabalho, onde nota-se que o ATP disponibiliza vários componentes de circuito para serem adicionados ao projeto.

É possível ver-se vários componentes como resistor, capacitor, indutor, além de combinações entre eles para serem adicionados na área de trabalho do ATPDraw. Esse software permite, ainda, a adição de vários outros componentes, como fontes de tensão, chaves, máquinas, transformadores, entre outros.

Figura 11 – Escolha dos componentes a serem adicionados no circuito elétrico do ATPDraw



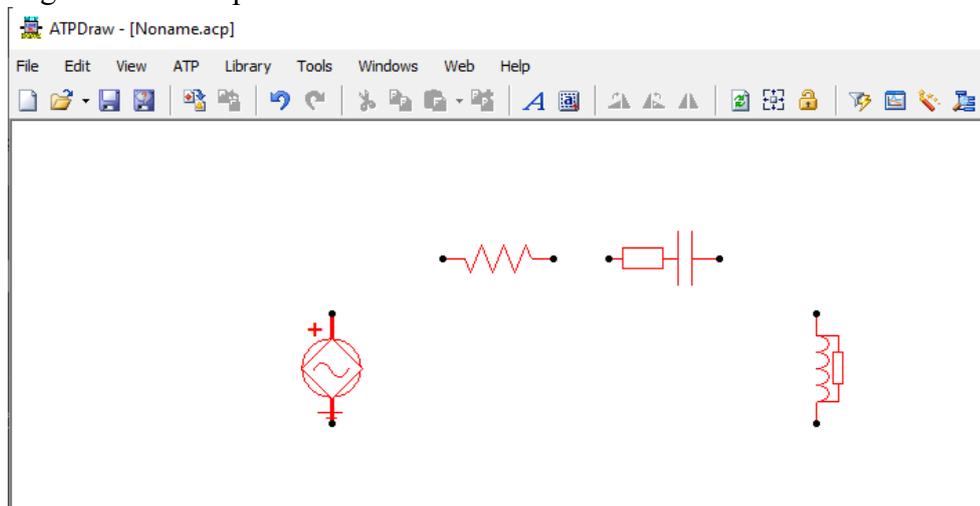
Fonte: O próprio autor (2019)

É observado na Figura 12 os componentes adicionados na área de trabalho do ATPDraw, após se seguir os passos citados anteriormente. Os componentes deste software são visualmente similares aos modelos dos seus respectivos componentes. Além disso, nota-se que

os componentes, quando adicionados, adquirem a cor vermelha, isso porque o ATPDraw sinaliza de vermelho os componentes cujos parâmetros ainda não foram especificados (FONSECA; LEAL, 2003), essa precaução é importante pois o programa consegue mostrar ao usuário uma irregularidade no circuito, evitando assim que o usuário não o simule de maneira errada.

Após os dispositivos serem todos inseridos na área de trabalho, deve-se interligá-los para que se tenha um circuito fechado, permitindo, assim, a circulação de corrente elétrica, esta ação é feita clicando-se uma vez com o botão esquerdo do mouse no ponto preto do componente até aparecer uma mão e a arrastando até o ponto preto do outro componente que se deseja conectar.

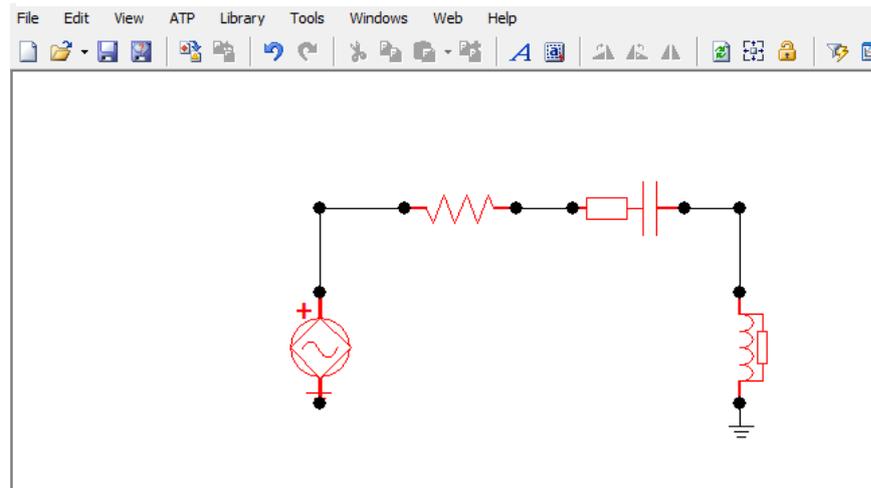
Figura 12 – Componentes adicionados na área de trabalho do ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

É mostrado na Figura 13 os componentes do circuito interligados, após se fazer os procedimentos citados acima. Os componentes ainda permanecem na cor vermelha, isso devido ao fato de que seus parâmetros ainda não foram definidos.

Figura 13 – Componentes do circuito interligados



Fonte: O próprio autor (2019)

3.2.3.3. Especificando os componentes

Para se especificar os parâmetros dos componentes no ATPDraw, deve-se dar dois cliques no componente desejado, com isso, abre-se uma caixa de diálogo como mostrado na Figura 14.

Nesta figura pode-se observar a caixa de diálogo usada para especificação dos parâmetros da fonte de tensão presente no circuito, como pode-se observar na imagem, é possível alterar parâmetros da fonte como amplitude da tensão da mesma, sua frequência, ângulo da fase, etc.

Figura 14 – Caixa de diálogo do ATPDraw para especificação dos parâmetros da fonte de tensão

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
AmplitudeA	Volt	10000	AC	1	
Frequency	Hz	50	ACNEG	1	
PhaseAngleA	degrees	0	Internal	1	
StartA	sec	-1			
StopA	sec	100			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: Current Voltage
 Num phases: Single 3-phase 3*1-phase
 Angle units: Degrees Seconds
 Amplitude: Peak L-G RMS L-G RMS L-L
 Grounding: Grounded Ungrounded Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

É observado na Figura 15 a caixa de diálogo mostradas pelo ATPDraw para alteração dos parâmetros do resistor presente no circuito mostrado na Figura 13. Nesta caixa de diálogo usada para especificação dos parâmetros do resistor, é possível alterar o valor da resistência do mesmo, entre outros parâmetros.

Figura 15 – Caixa de diálogo do ATPDraw para especificação dos parâmetros do resistor

Component: RESISTOR

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R	Ohm	1000	From	1	
			To	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No Hide \$Vintage.1
 NumPh 1

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

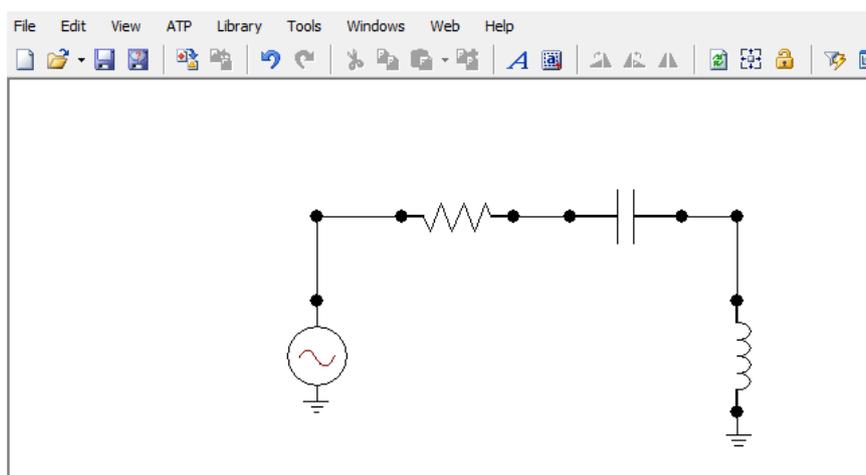
Analogamente a caixa de diálogo para alterações nos parâmetros do resistor, uma caixa de diálogo muito parecida é mostrada pelo ATPDraw para alteração nos parâmetros do capacitor e do indutor, sendo que nestas se pode alterar parâmetros como valor de capacitância e indutância, para os componentes capacitor e indutor, respectivamente.

Os parâmetros do circuito foram definidos da seguinte forma:

- Tensão da fonte CA: 100 V;
- Valor da resistência: 10 k Ω ;
- Valor da indutância: 1 mH;
- Valor da capacitância: 1 μ F;

Ao se definir os parâmetros de todos os elementos do circuito, como observado na Figura 16, os mesmos adquiriram a cor preta, ratificando o que foi dito anteriormente. É observado, ainda, o circuito RLC montado anteriormente com os parâmetros de todos os elementos do circuito bem definidos.

Figura 16 – Circuito RLC no ATPDraw com os parâmetros de todos os elementos do circuito definidos



Fonte: O próprio autor (2019)

Um exemplo de simulação no ATPDraw deste circuito RLC montado e parametrizado é mostrado no apêndice A deste trabalho, onde pode-se ver o passo a passo para se fazer uma simulação e os resultados obtidos da mesma.

3.3. Modelagem do alimentador de distribuição

3.3.1. Considerações iniciais

Nesta seção apresenta-se desde todos os componentes utilizados na modelagem do sistema de distribuição da rede do Campus do Pici até o próprio sistema de distribuição modelado no ATPDraw.

É apresentado inicialmente os dados da rede do Pici. Posteriormente é mostrado como se criar um arquivo no ATPDraw para ser utilizado na simulação, pois foi preferido se utilizar os relés de proteção de sobrecorrente criados seguindo uma lógica de programação em vez de utilizar os componentes disponibilizados pelo ATPDraw.

Nem todos os componentes utilizados na simulação foram criados utilizando-se uma lógica de programação no ATPDraw, é apresentado, então, o restante de todos os componentes presentes na rede de distribuição e sua modelagem na ferramenta de simulação, assim como seus parâmetros baseados nos dados reais da rede do Pici.

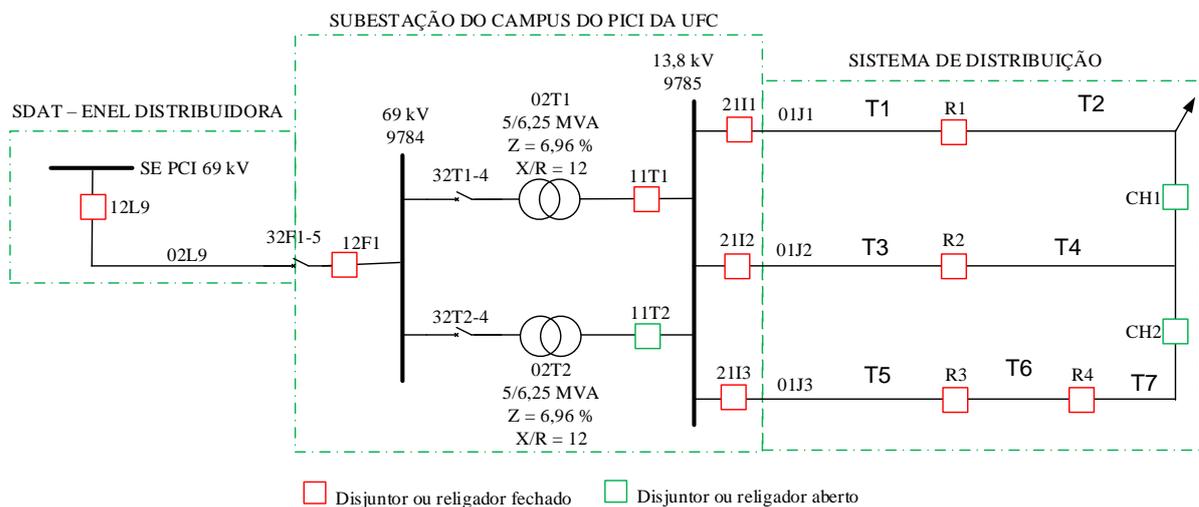
Os componentes apresentados e modelados neste capítulo são os relés de proteção contra sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo, disjuntor, Fonte de tensão e barra de referência, linha de distribuição, transformador de potencial, cargas, amperímetro comum, amperímetro de valor eficaz, geração distribuída, curto-circuito trifásico e, por fim, o sistema elétrico do Campus do Pici.

3.3.2. Características da Rede elétrica do Campus do Pici da UFC

O Sistema elétrico do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará, composto de uma subestação 69-13,8 kV e uma rede de distribuição em 13,8 kV com 6,3 km é suprido por meio da linha de transmissão, 02L9, oriunda da barra de 69 kV da subestação Pici (SE PCI) pertencente a concessionária de energia Enel, conforme mostrado no diagrama unifilar da Figura 17. Conforme pode ser observado no diagrama unifilar, a Subestação do Campus do Pici possui um vão de entrada de linha de 69 kV, um barramento simples em 69 kV, dois transformadores de potência 69-13,8 kV, 02T1 (em operação) e 02T2 (reserva), ambos com potência de 5/6,25 MVA, uma barra de simples em 13,8 kV, protegida pelos relés associados aos disjuntores 11T1 e 11T2, e três vãos de saída de alimentadores com relés associados aos religadores 21J1, 21J2 e 21J3 responsáveis pela proteção geral dos alimentadores 01J1, 01J2 e

01J3, respectivamente. O sistema de distribuição em 13,8 kV possui topologia radial com recurso caracterizada pelos religadores normalmente abertos (CH1 e CH2). Em condições normais de operação o alimentador 01J1 supri as cargas do trecho T1 e T2, o alimentador 01J2 supri as cargas dos trechos T3 e T4 e o alimentador 01J3 supri as cargas dos trechos T5, T6 e T7, sendo que cada trecho é protegido por um religador.

Figura 17 - Sistema elétrico de média tensão de distribuição do Campus do Pici

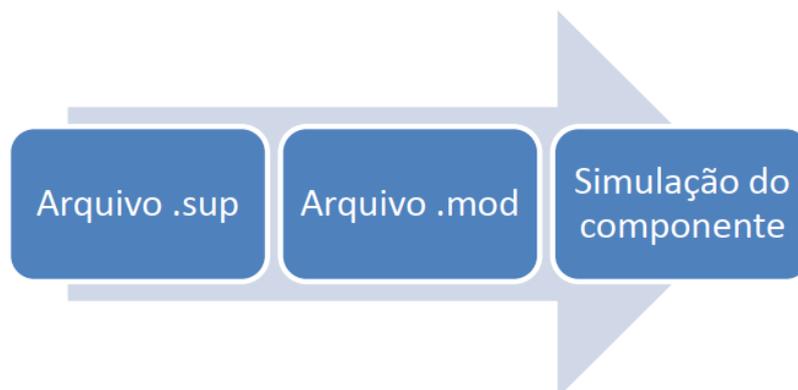


Fonte: PROJETO... (2018)

3.3.3. Criação de um componente no ATPDraw

O ATPDraw possui diversos componentes que podem ser utilizados na modelagem e simulação de uma rede elétrica, mas além de todos os componentes que a ferramenta dispõe para uso, a mesma permite que o usuário crie outros componentes através da linguagem “models”, ao se criar este novo componente, mesmo pode então ser inserido no circuito, seguindo as três etapas mostradas na Figura 18.

Figura 18 – Etapas para criação de um “models” no ATPDraw

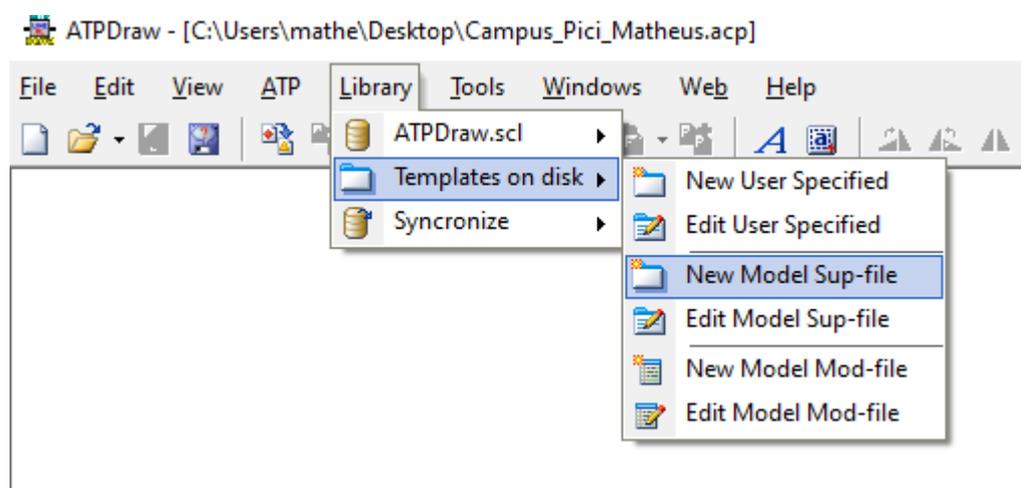


Fonte: XAVIER; ROMANO (2013)

3.3.3.1. Arquivo .sup

Este formato de arquivo permite ao usuário definir como será o ícone do componente, além de seus terminais de saída e entrada e quais são seus dados alteráveis (XAVIER; ROMANO, 2013). Um arquivo .sup pode ser criado clicando-se no botão “*Library*”, em seguida em “*Templates on disk*” e por fim em “*New Model Sup-file*” como observado na Figura 19.

Figura 19 – Passos para criação de um arquivo .sup

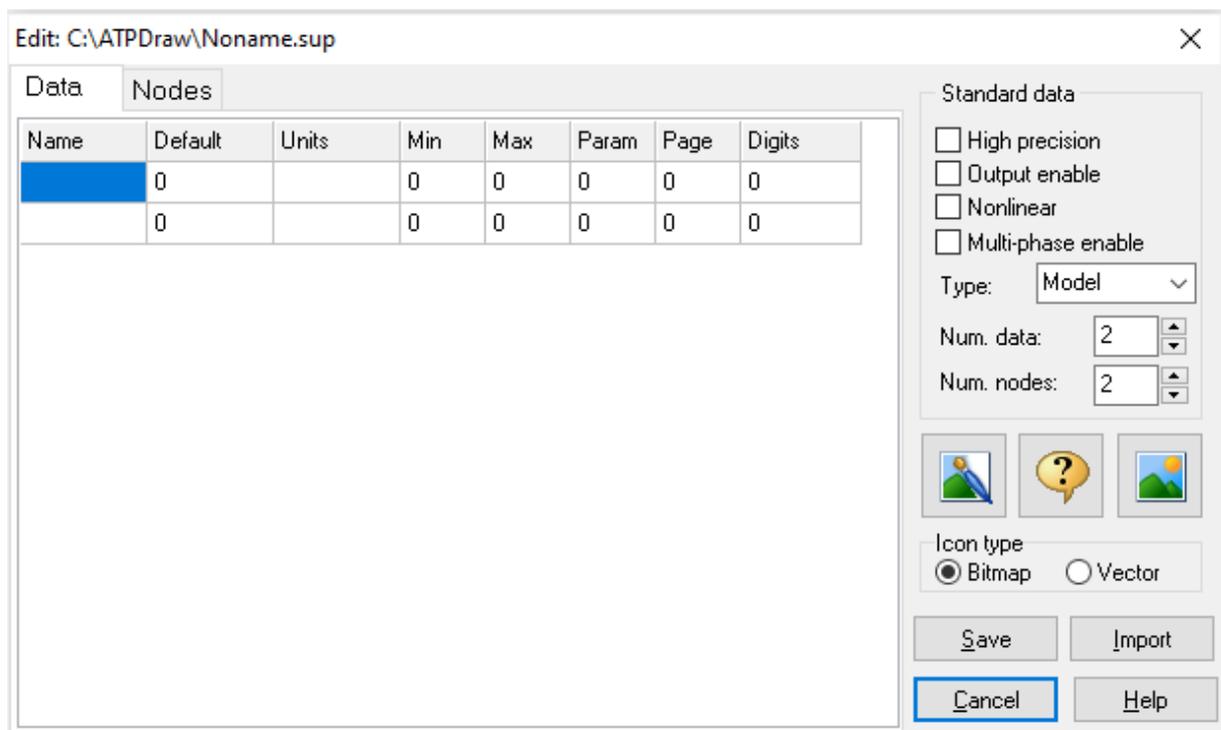


Fonte: O próprio autor (2019)

Além de se criar um arquivo .sup, pode-se, também, editar um arquivo .sup já criado anteriormente, clicando-se em “*Edit Model Sup-file*”.

É observado na Figura 20 a janela de diálogo do ATPDraw para a criação de um arquivo .sup, quando se realiza os passos citados anteriormente. Na aba “Data” se define quais são os dados do arquivo .sup que podem ser modificados pelo usuário em “Num. data” se define quantos são estes dados modificáveis, já na aba “Nodes”, se define quais são os terminais, tanto de saída, quanto de entrada do novo componente e em “Num. nodes” de define quantos são estes terminais. Além destas opções de edição, a janela de diálogo possui o botão “Icon Editor”, que permite desenhar o ícone propriamente dito, o deixando, assim, ao gosto do usuário que o está criando.

Figura 20 – Janela de diálogo do ATPDraw para criação de um arquivo .sup



Fonte: O próprio autor (2019)

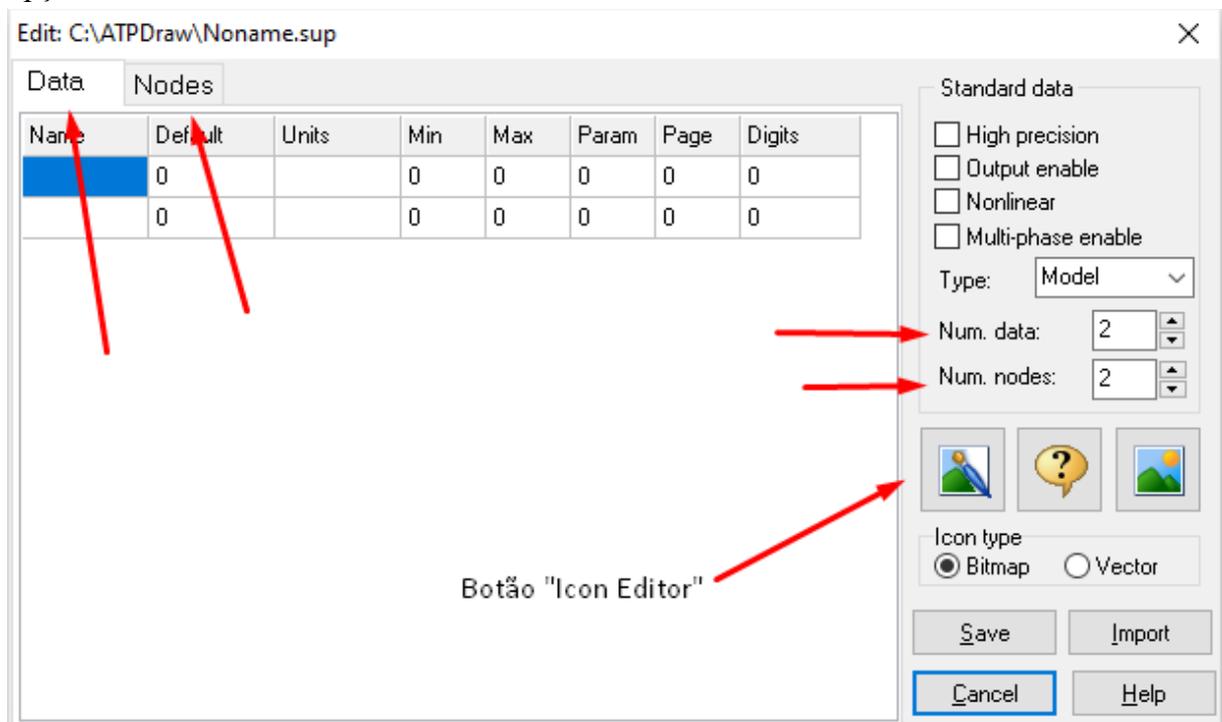
É analisado na Figura 21 as opções de edição apresentadas na janela de diálogo do ATPDraw para criação de um arquivo .sup, conforme citadas anteriormente.

Na aba “Data” tem-se a coluna “Name”, que é usada para nomear o dado que é preenchido pelo usuário, a coluna “Default”, que é usada definir um valor que normalmente é usado para determinado usuário, a coluna “Units”, que é usada para definir a unidade a ser adotada para o determinado dado, as colunas “Min” e “Max”, que são utilizadas para definir os valores mínimos e máximos a serem adotados para o determinado dado, respectivamente, a coluna “Param” que é usada para definir o valor parâmetro do determinado dado e a coluna

“*Digits*”, que é usada para definir o número máximo de dígitos aceitáveis de um determinado dado (MIGUEL, 2011; XAVIER; ROMANO, 2013).

Na aba “*Nodes*” tem-se a coluna “*Name*”, que é usada para nomear a entrada ou a saída do componente, a coluna “*Kind*”, que é usada para indicar qual é o tipo da variável, se esta coluna for definida com o número 0, indica que a variável é um terminal de saída, se for definida com o número 1, indica que a variável é um terminal de entrada de corrente, se for definida com o número 2, indica que a variável é um terminal de entrada de tensão, a coluna “*#Phases*”, que é usada para definir o número de fases do componentes, ou seja, indica se os seus terminais são monofásicos ou trifásicos e a coluna “*Pos.x*” e “*Pos.y*”, que são usadas para definir a posição do terminal do ícone (MIGUEL, 2011; XAVIER; ROMANO, 2013).

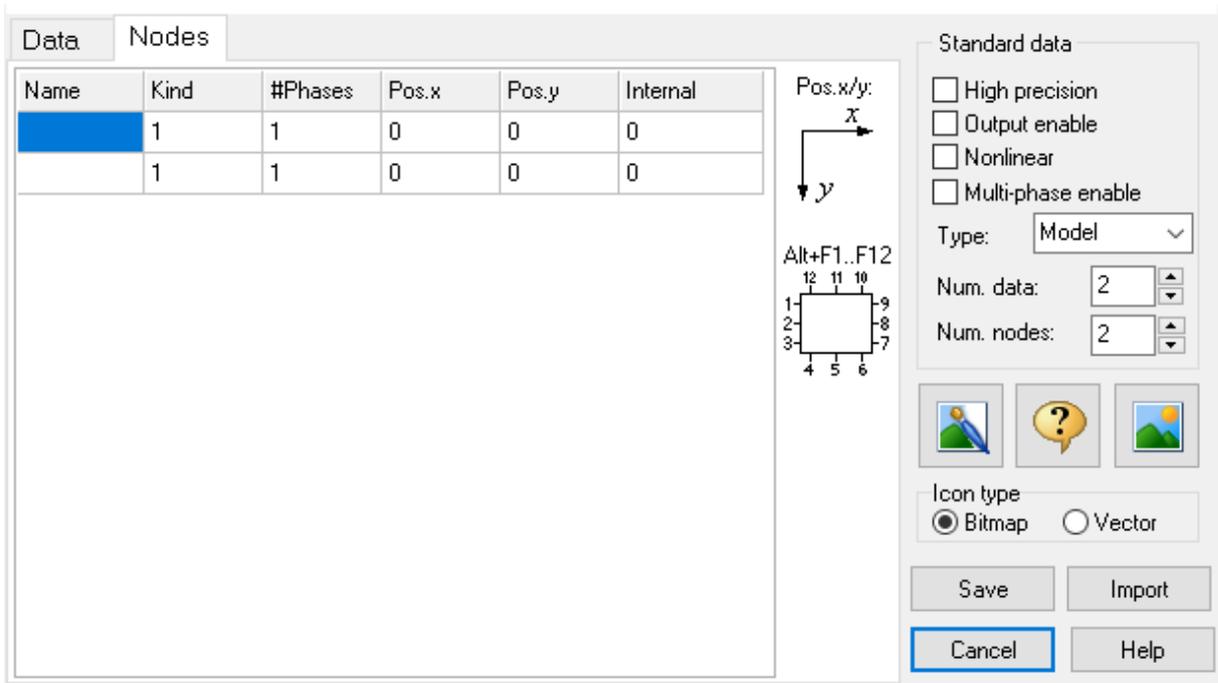
Figura 21 – Janela de diálogo do ATPDraw para criação de um arquivo .sup sinalizando as opções citadas



Fonte: O próprio autor (2019)

É observado na Figura 22 a janela de diálogo do ATPDraw para criação do arquivo .sup mostrando as colunas da aba “*Nodes*”.

Figura 22 – Janela de diálogo do ATPDraw para criação de um arquivo .sup

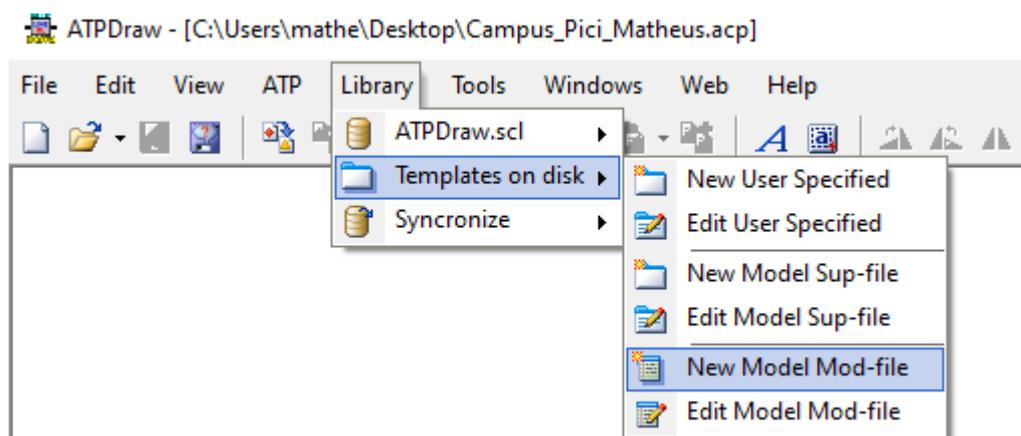


Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.3.2. Arquivo .mod

É no arquivo .mod que o usuário pode definir a lógica de programação que será seguida pelo componente (XAVIER; ROMANO, 2013). Um arquivo .mod pode ser criado clicando-se no botão “Library”, em seguida em “Templates on disk” e por fim em “New Model Mod-file” como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Passos para criação de um arquivo .mod



Fonte: O próprio autor (2019)

Similar ao arquivo .sup, também pode-se editar um arquivo .mod já criado anteriormente, clicando-se em “*Edit Model Mod-file*”.

É observado na Figura 24 a janela de diálogo do ATPDraw para a criação de um arquivo .mod, quando se realiza os passos citados anteriormente, nela o usuário pode escrever as linhas de códigos que definem a lógica de programação do referido arquivo.

Para o perfeito funcionamento deste tipo de arquivo, deve-se estar presente no mesmo as cláusulas INPUT, onde se define as variáveis de entrada do componente e são provenientes do circuito, DATA, Onde se define as variáveis que podem ser modificadas pelo usuário, OUTPUT, onde se define as variáveis de saída do componente e são exportadas para o circuito, VAR, que define as variáveis que serão utilizadas internamente na programação do componente, INIT, que permite iniciar as variáveis com valores pré-definidos e EXEC, que é o módulo de execução do componente e é onde o usuário pode escrever as linhas de código da lógica de programação a ser implementada no componente (MIGUEL, 2011; XAVIER; ROMANO, 2013).

Figura 24 – Janela de diálogo do ATPDraw para criação de um



Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.3.3. Simulação com componente criado

De mãos os arquivos .sup e .mod criados, o usuário pode, então, simular o componente em um circuito qualquer de sua preferência. Posteriormente, diante dos resultados da simulação, o usuário pode verificar se a lógica aplicada ao componente está realmente correta, devido ao fato de o ATPDraw permitir que seja plotado todas as variáveis implementadas no componente criado (XAVIER; ROMANO, 2013).

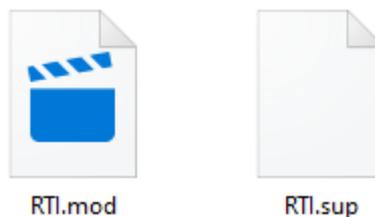
3.3.4. Modelagem dos componentes utilizados nas simulações deste trabalho

3.3.4.1. Relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo – Função 50/51

Para a criação do componente do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo, foram criados os arquivos .sup e .mod, seguindo todos os passos citados anteriormente. Os dois arquivos foram nomeados com a sigla RTI (sigla para Relé Temporizado Instantâneo).

É mostrado na Figura 25 os arquivos criados para a implementação do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.

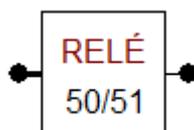
Figura 25 – Arquivos .sup e .mod criados para implementação do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.



Fonte: O próprio autor (2019)

É observado na Figura 26 o componente do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo criado e inserido na área de trabalho do ATPDraw. Este componente possui uma entrada e uma saída, sendo a entrada trifásica, que recebe os valores da corrente atuante no circuito em que o relé está inserido, e a saída monofásica, que é responsável por mandar o sinal de trip para o disjuntor.

Figura 26 – Componente do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.



Fonte: O próprio autor (2019)

Este relé foi implementado criando-se seis entradas de dados, em que seus valores devem ser fornecidos pelo usuário, são elas:

- Is51: Corrente de ajuste da função 51, em Ampères;
- tret51: Tempo de retardo, em segundos;
- Tipo51: Tipo de curva a ser usado, adimensional;
- k51: Dial de tempo da função 51, adimensional;
- RTC: Relação de transformação do transformador de corrente, adimensional;
- Is50: Corrente de ajuste da função 50, em Ampères.

O valor a ser inserido pelo usuário para o dado “*Is51*” se refere ao valor RMS da corrente vista pelo secundário do transformador de corrente. O dado “*tret51*” se refere ao tempo de retardo de atuação do relé que pode ser definido inicializando o valor deste dado com o valor do tempo de retardo desejado, caso seja inicializado com o valor zero, o tempo de retardo de atuação da função temporizada do relé será definido de acordo com as curvas de tempo inverso IEEE e IEC. Caso o usuário deseje um tempo de retardo definido, além de preencher o valor do tempo de retardo desejado no dado “*tret51*”, o usuário deve preencher o dado “*Tipo51*” com 0, e o valor do dado “*k51*” pode ser preenchido com qualquer valor, pois este dado não será considerado neste caso.

Entretanto, caso o usuário deseje utilizar uma das curvas de tempo inverso citadas anteriormente, este deve inicializar o dado “*Tipo51*” com o valor que representa a curva desejada de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Valor a ser inserido para a curva escolhida

Tipo51	NORMA	CURVA
1	IEC	Inversa
2	IEC	Muito Inversa
3	IEC	Extremamente Inversa
4	IEC	Inversa de Tempo Longo
5	IEEE	Inversa
6	IEEE	Moderadamente Inversa
7	IEEE	Muito Inversa

Fonte: O próprio autor (2019)

Ao se escolher alguma destas curvas, não é necessário se preencher o dado “*tret51*”, pois o tempo de retardo é calculado através da lógica programada no componente relé que foi criado.

É mostrado na Figura 27 a janela de diálogo do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo que aparece ao se dar um duplo clique no componente mostrado na Figura 26, estes dados terão que ser preenchidos pelo usuário na aba “*Data*” e as variáveis de entrada e saída do componente na aba “*Node*”.

Figura 27 – Janela de diálogo do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.

The dialog box 'MODEL: RTI' contains the following data:

DATA	UNIT	VALUE
Is51	A	1
tret51	s	1
Tipo51		1
k51		1
RTC		1
Is50		1

NODE	PHASE	NAME
I	1	
TRIP	1	

Additional fields and controls include: Order: 0, Label: [empty], Comment: [empty], Model: RTI, Use As: RTI, and checkboxes for Hide and Protect.

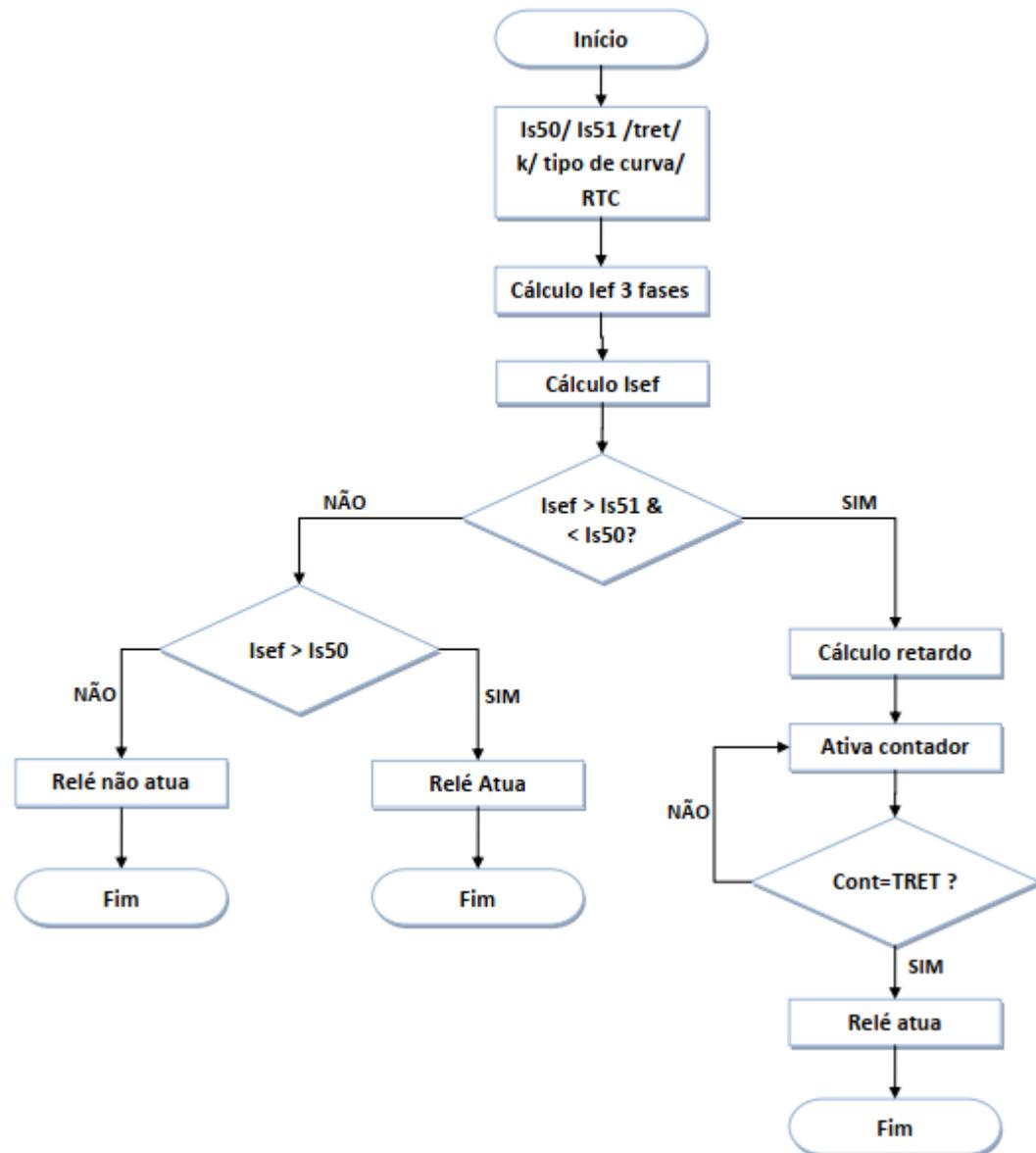
Fonte: O próprio autor (2019)

O arquivo .mod do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo contendo todo o código utilizado para a implementação deste componente se encontra no Anexo A deste documento.

É observado na Figura 28 o fluxograma que representa a lógica implementada na programação do arquivo .mod do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo. A

lógica de programação usada na no arquivo .mod deste relé se baseia em receber inicialmente os valores das correntes de ajustes das funções 50 e 51, além do Dial de tempo, tempo de retardo, tipo da curva e a relação de transformação do TC utilizado. De mãos destes valores, o componente calcula os valores eficazes das correntes de cada fase do circuito, e com o valor de RTC calcula-se, então, os valores eficazes destas correntes referidas ao secundário do transformador de corrente. A função de sobrecorrente instantânea (função 50) só irá atuar quando o valor da corrente de curto-circuito referida ao secundário do TC for maior ou igual ao valor da corrente de ajuste da função 50. No caso em que a corrente de curto-circuito referida ao secundário do TC é menor que o valor da corrente de ajuste da função 50, ou seja, no caso de esta não atuar, ativa-se um contador, e quando este atinge o valor de tempo de retardo que foi calculado em conformidade com a curva escolhida pelo usuário, ou em conformidade com o tempo de retardo definido pelo mesmo, o componente envia um sinal de saída que é usado para abrir as chaves utilizadas na simulação para atuarem como o disjuntor da rede em estudo (XAVIER; ROMANO, 2013).

Figura 28 – Fluxograma da lógica de programação do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo



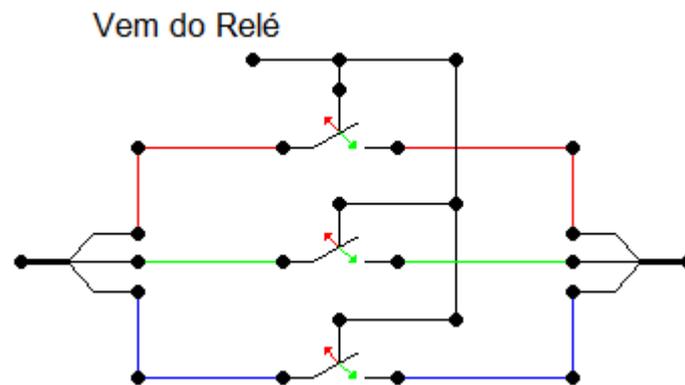
Fonte: XAVIER; ROMANO (2013)

3.3.4.2. Disjuntor

Para se fazer a modelagem do disjuntor utilizado nas simulações deste trabalho, utilizou-se uma chave comandada por um sinal de trip para cada fase do circuito, como mostrado na Figura 29, este sinal de trip é proveniente do bloco criado para o relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo.

Estas chaves abrem com um sinal de trip de valor igual a 0 e fecham com um trip de valor igual a 1, logo, o sinal de trip proveniente do relé deve ter valor igual a zero quando o mesmo atuar, para assim abrir o circuito.

Figura 29 - Chaves utilizadas para a modelagem do disjuntor no ATPDraw



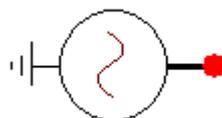
Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.3. Fonte de tensão e barra de referência

Também chamada de barra 0, a barra de referência de um sistema elétrico de potência representa o nó em que se tem a principal fonte de geração de energia elétrica do sistema elétrico de potência (PESSOA, 2016).

Diante disso, o gerador de energia elétrica foi considerado como um elemento externo ao sistema, e por isso, foi modelado apenas como uma fonte de tensão trifásica de corrente alternada, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Fonte de tensão no ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

Os parâmetros da fonte de tensão usada para as simulações deste trabalho foram definidos de acordo com os dados da rede de distribuição de média tensão do Campus do Pici e são mostrados na Figura 31, onde pode-se observar que o valor eficaz da amplitude da tensão

de linha da fonte é de 69 kV, é uma fonte de tensão trifásica com um de seus terminais conectados ao terra e operando com uma frequência de 60 Hz.

Figura 31 - Parâmetros da fonte de tensão

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	69000
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	ABC	69kV

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: Current Voltage

Num phases: Single 3-phase 3*1-phase

Angle units: Degrees Seconds

Amplitude: Peak L-G RMS L-G RMS L-L

Grounding: Grounded Ungrounded Hide

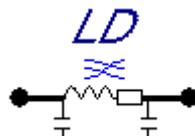
Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.4. Linha de distribuição

As linhas de distribuição são utilizadas para realizar as interconexões entre os dispositivos que compõem o sistema elétrico de potência (PESSOA, 2016). A modelagem destes elementos no ATPDraw foi feita de acordo com os valores de impedâncias reais da linha de distribuição da rede do Pici e é mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Linha de Distribuição modelada no ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

É observado na Figura 33 os parâmetros do componente utilizado para modelar a linha de distribuição que podem ser modificados pelo usuário, onde pode-se ver os valores de resistência, indutância e capacitância se sequência positiva e de sequência zero deste elemento.

Figura 33 - Parâmetros da Linha de Distribuição

Component: LINEPI3S

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R0	Ohm/m	0.77694
L0	Ohm/m	1.97213
C0	μ S/m	0
R+	Ohm/m	0.5991
L+	Ohm/m	0.44795
C+	μ S/m	0

NODE	PHASE	NAME
In	ABC	
Out	ABC	

Copy Paste Reset Order: 0 Label: LD

Comment:

Lines
Length: 0.88 [m] Hide \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

Os dados de impedâncias de todos os trechos da rede do Pici são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados dos trechos da linha de distribuição da rede do Pici

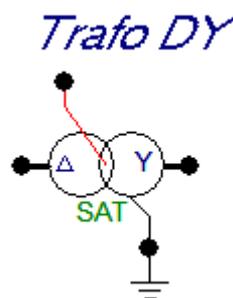
NOME DO TRECHO	COMPRIMENTO (KM)	RESISTÊNCIA (Ω /KM)	INDUTÂNCIA (Ω /KM)
TRECHO A	0,88	0.5991	0.44795
TRECHO B	1,021	0.5992	0.44796
TRECHO C	0,84	0.5993	0.44797
TRECHO D	0,447	0.5994	0.44798
TRECHO E	0,488	0.5995	0.44799
TRECHO F	0,265	0.5996	0.44800
TRECHO G	0,466	0.5997	0.44801

Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.5. Transformador de potencial

Para a modelagem do transformador de potencial no ATPDraw foi utilizado um transformador trifásico saturável, sendo este de dois enrolamentos, conforme mostrado na Figura 34. Este transformador de potencial tem sua ligação em delta no primário e em estrela aterrada no secundário.

Figura 34 - Modelo de transformador trifásico saturável no ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

Os valores dos parâmetros do transformador de potencial modelado da rede do Pici estão descritos na Figura 35.

Este transformador possui tensão primária de linha igual a de fase e iguais a 69 kV e tensão de secundária de fase igual a 7.967,43 V, equivalente a uma tensão secundária de linha igual a 13,8 kV, com defasamento angular de 30°.

Todos os parâmetros deste transformador modelado foram baseados nos dados reais da rede de distribuição do Pici.

Figura 35 - Parâmetros do transformador

Component: SATTRAFO

Attributes Characteristic

	Prim.	Sec.
U [V]	69000	7967.43
R [ohm]	4.745	0.0632
L [mH,ohm]	98.867	1.318

Coupling: D Y

Phase shift: 30

I(0)= 0.21520E Rm= 755714.2

F(0)= 259.01

3-leg core
 RMS
 3-winding

NODE	PHASE	NAME
Primary	ABC	
Secondary	ABC	
Starpoint	ABC	
Sec-N	1	

Order: 0 Label: Trafo DY

Comment:

Output: 0 - No Hide

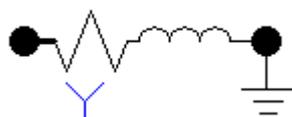
Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.6. Cargas

Para a modelagem das cargas conectadas aos alimentadores de distribuição da rede do Pici, foi utilizado um elemento de circuito RLC conectado em Y, conforme mostrado na Figura 36. Os parâmetros das cargas conectadas em cada barramento foram definidos baseados nos dados reais da rede do Pici.

Figura 36 - Modelagem das cargas no ATPDraw



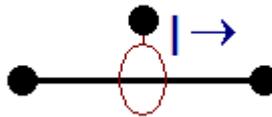
Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.7. Amperímetro comum

Para se medir as correntes de carga e de curto-circuito provenientes dos circuitos do alimentador de distribuição da rede do Pici, foi utilizado o amperímetro trifásico que faz parte dos componentes disponibilizados pelo ATPDraw, conforme observado na Figura 37.

Este amperímetro é utilizado em conjunto com o relé digital apresentado no item 4.4.1. para se medir a corrente de curto-circuito, corrente essa utilizada como entrada do relé digital.

Figura 37 – Modelagem do Amperímetro no ATPDraw

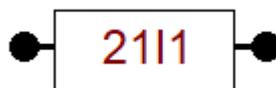


Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.8. Amperímetro de valor eficaz

Diferentemente do amperímetro disponibilizado no ATPDraw definido no item 4.4.7., o amperímetro de valor eficaz, mostrado na Figura 38, foi criado para se ter como saída o valor eficaz da corrente medida, este valor de saída é utilizado principalmente para a leitura das correntes de carga e de curto-circuito eficazes utilizada para a parametrização dos relés que serão feitas posteriormente.

Figura 38 - Modelagem do amperímetro de valor eficaz no ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.9. Geração distribuída

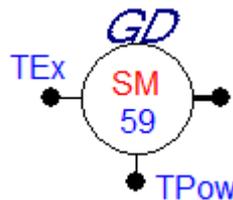
Para se analisar os impactos inserção das gerações distribuídas na rede do Pici, que é o foco deste trabalho, estas foram modeladas de duas formas diferentes, uma representando

uma geração distribuída genérica proveniente de uma máquina síncrona e a outra representando uma geração de energia solar;

4.4.9.1 Geração distribuída proveniente de uma máquina síncrona

Para a modelagem de uma GD proveniente de uma máquina síncrona no ATPDraw utilizou-se um modelo de um gerador síncrono não controlado, conforme Figura 39. Esta GD foi modelada de forma que a mesma apresentasse uma potência nominal instalada de 2,25 MW. Ela acopla-se ao sistema de distribuição, na mesma classe de tensão do local em que está sendo inserida, ou seja, nos barramentos de 13,8 kV, dispensando a presença de transformadores de potencial.

Figura 39 - Modelo de geração distribuída para PCH no



Fonte: O próprio autor (2019)

Os parâmetros definidos para este tipo de geração distribuída são informados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados da Máquina Síncrona da Geração Distribuída

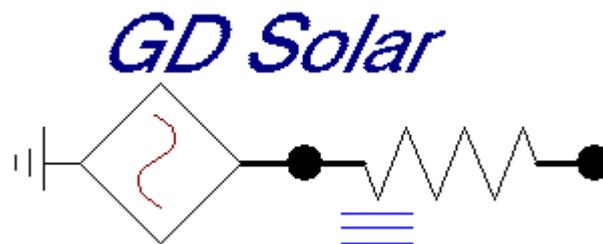
PARÂMETROS	VALORES
Potência Nominal	2,5 MVA
Tensão Nominal	13,8 kV
Frequência	60 Hz
Número de Polos	36
Corrente de Campo	18 A
X_d, X_d', X_d''	1,25; 0,47; 0,32 (pu)
X_q, X_q', X_q''	0,70; 0,62; 0,30 (pu)
X_l, X_0	0,12; 0,18 (pu)
T_{d0}', T_{d0}''	3,8; 0,035 (s)
Momento de Inércia	52,154 (kg.m ²)

Fonte: O próprio autor (2019)

4.4.9.2 Geração solar fotovoltaica

Para a modelagem da geração solar fotovoltaica no ATPDraw foi utilizado uma fonte de corrente alternada trifásica acoplada a um resistor trifásico representado o conjunto de geração juntamente com o inversor, em que ajustou-se o valor de corrente da fonte em 13,88 A, representando-se unidades com sistema de armazenamento (CES, 2018), conforme Figura 40.

Figura 40 - Modelagem da geração solar fotovoltaica no ATPDraw

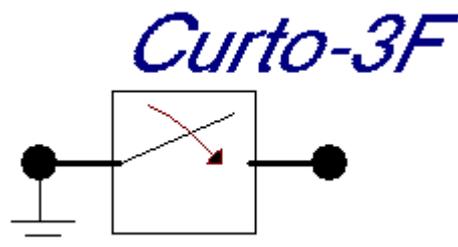


Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.10. Curto-circuito trifásico

Para a modelagem do curto-circuito trifásico utilizou-se uma chave trifásica controlado por tempo disponível no ATPDraw, conforme mostrado na Figura 41, neste componente pode-se definir o tempo em que cada uma das três chaves é fechada. Escolheu-se um tempo aleatório para o fechamento das chaves, pois o foco do estudo é o analisar o tempo em que a proteção atua, e não o tempo em que o curto ocorre. Para se simular um curto-circuito trifásico as chaves devem ser fechadas no mesmo tempo.

Figura 41 - Modelagem do curto-circuito trifásico no ATPDraw

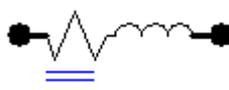


Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.4.11. Dispositivo limitador de corrente de curto-circuito

Para a modelagem do dispositivo limitador de corrente de curto-circuito utilizou-se uma carga trifásica disponível no ATPDraw, conforme mostrado na Figura 42, neste componente pode-se definir seus valores de resistência, indutância e capacitância trifásica.

Figura 42 - Modelagem do DLCC no ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

3.3.5. Modelagem do sistema elétrico do Campus do Pici no ATP

A rede de distribuição de média tensão do Campus do Pici foi modelada usando-se os elementos citados anteriormente, e seguindo os parâmetros reais desta rede de distribuição, a modelagem desta rede é mostrada na Figura 43.

Diante da rede modelada, simulou-se a mesma no ATPDraw e obteve-se as correntes de carga de cada trecho dos alimentadores, além disso, colocou-se um curto-circuito trifásico em cada barramento e simulou-se as correntes de curto-circuito de cada um deles isoladamente.

Com estes valores de correntes de carga e de curto-circuito de cada barramento, pode-se dimensionar os ajustes dos relés de proteção de cada trecho da rede do Pici, esses cálculos serão feitos posteriormente.

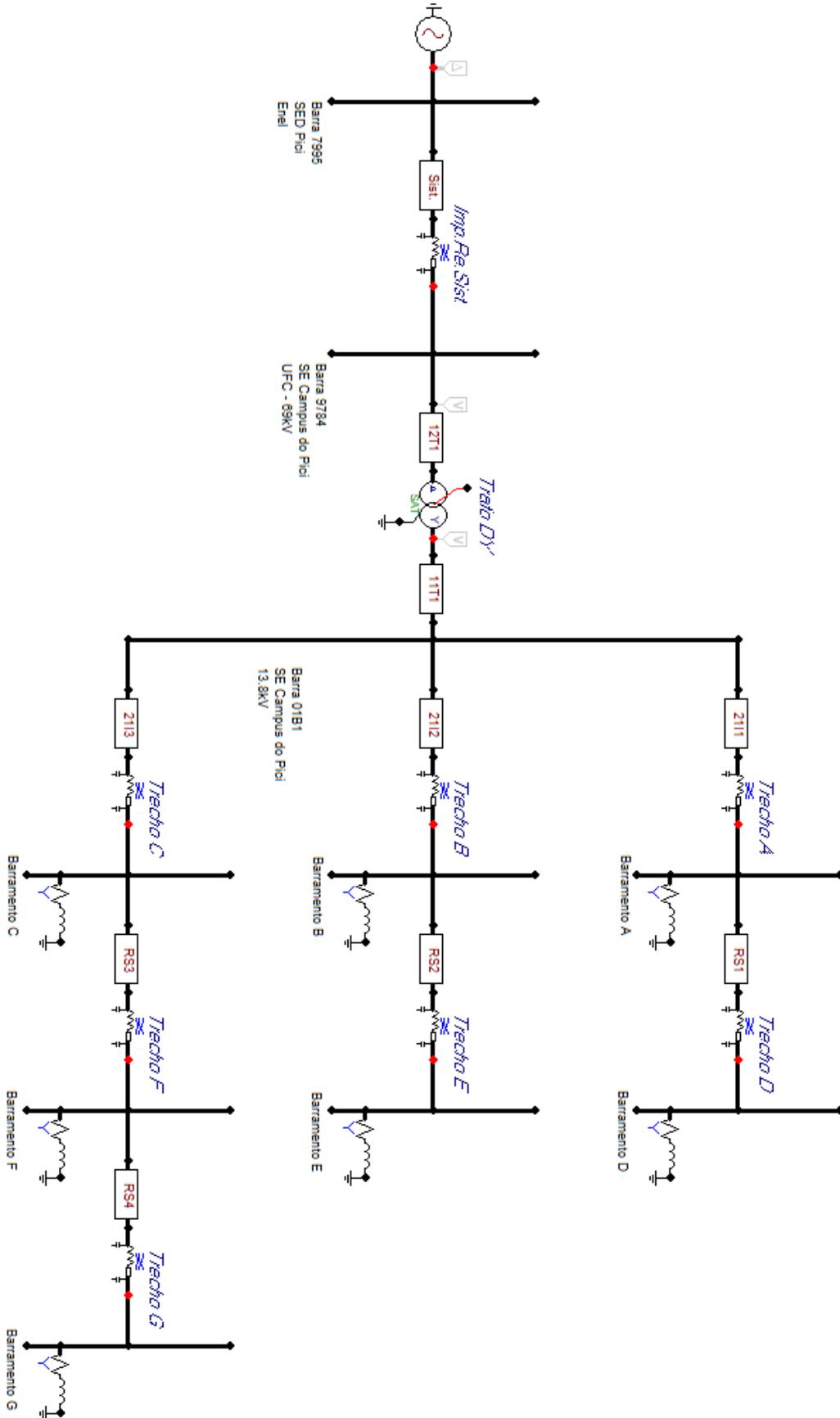
Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5, em que pode-se ver as correntes de carga e de curto-circuito de cada trecho, apresentando-se, para cada corrente, seus valores de pico e RMS.

Tabela 5 - Valores de correntes de carga e de curto-circuito de cada trecho

TRECHO A			TRECHO D					
Icarga.A.RMS =	44,546	A	Icarga.D.RMS =	25,944	A			
Icarga.A.Vp =	62,998	A	Icarga.D.Vp =	36,690	A			
Icc3F.A.RMS =	2307,3	A	Icc3F.D.RMS =	2137,9	A			
Icc3F.A.Vp =	3263,0	A	Icc3F.D.Vp =	3023,4	A			
TRECHO B			TRECHO E					
Icarga.B.RMS =	48,194	A	Icarga.E.RMS =	19,157	A			
Icarga.B.Vp =	68,157	A	Icarga.E.Vp =	27,092	A			
Icc3F.B.RMS =	2252,9	A	Icc3F.E.RMS =	2074,2	A			
Icc3F.B.Vp =	3186,08	A	Icc3F.E.Vp =	2933,36	A			
TRECHO C			TRECHO F			TRECHO G		
Icarga.C.RMS =	96,278	A	Icarga.F.RMS =	87,012	A	Icarga.G.RMS =	35,2	A
Icarga.C.Vp =	136,158	A	Icarga.F.Vp =	123,054	A	Icarga.G.Vp =	49,780	A
Icc3F.C.RMS =	2330,8	A	Icc3F.F.RMS =	2229	A	Icc3F.G.RMS =	2060,4	A
Icc3F.C.Vp =	3296,25	A	Icc3F.F.Vp =	3152,28	A	Icc3F.G.Vp =	2913,85	A

Fonte: O próprio autor (2019).

Figura 43 – Rede de Média Tensão do Campus do Pici modelada no ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

3.4. Procedimento para cálculo dos ajustes dos relés de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo

3.4.1. Considerações iniciais

Nesta seção apresenta-se o procedimento básico a ser seguido para o correto dimensionamento das proteções de sobrecorrente temporizadas e instantâneas. Este procedimento é apresentado todo na forma literal, pois os resultados dos cálculos dos ajustes e parâmetros dos relés de proteção serão mostrados no capítulo 4.

3.4.2. Escolha do Transformador de Corrente e cálculo do RTC

Para a escolha do Transformador de Corrente (TC) que auxilia o relé de proteção na leitura da corrente de curto circuito, deve-se seguir os seguintes critérios:

- 1) A corrente do primário do TC deve ser maior que a corrente de carga máxima do circuito;

$$I_{P_{TC}} > I_{carga_{m\acute{a}x}} \quad (6)$$

- 2) A corrente do primário do TC deve ser maior que a corrente de curto-circuito trifásico dividida por um Fator de Segurança (FS);

$$I_{P_{TC}} > \frac{I_{CC_{3f}}}{FS} \quad (7)$$

- 3) FS = 20.

A relação de transformação do TC (RTC) é calculada usando-se a seguinte fórmula:

$$RTC = \frac{I_{P_{TC}}}{I_s} \quad (8)$$

Em que a maioria dos TC utilizados no Brasil possuem a corrente do secundário normalmente igual a 5 A.

3.4.3. Cálculo da corrente de ajuste da função 51 (temporizada)

Para o cálculo da corrente de ajuste da função 51, deve-se seguir os seguintes critérios:

- 1) A corrente de ajuste da função 51 deve obedecer a fórmula:

$$I_{ajuste_{51}} = \frac{F_S * I_{carga_{m\acute{a}x}}}{RTC} \quad (9)$$

- 2) F_S é um valor constante entre 1,2 e 1,5;
 3) A corrente de ajuste da função 51 deve ser menor ou igual a corrente de curto-circuito bifásico dividida pela multiplicação entre F_S e o RTC.

$$I_{ajuste_{51}} \leq \frac{I_{CC_{2f}}}{F_S * RTC} \quad (10)$$

Onde a corrente de curto-circuito bifásica pode ser calculada seguindo a seguinte fórmula:

$$I_{CC_{2f}} = I_{CC_{3f}} * \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (11)$$

3.4.4. Cálculo da corrente de Pick-up e do Múltiplo da função 51

Diante dos valores da corrente de ajuste da função 51 e do RTC do TC escolhido, pode-se calcular a corrente de Pick-up do relé de proteção multiplicando-se a corrente de ajuste da função 51 pelo RTC:

$$I_{Pick-up} = I_{ajuste_{51}} * RTC \quad (12)$$

Com o valor da corrente de Pick-up calculada, pode-se definir o Múltiplo da função 51 dividindo-se a corrente de curto-circuito trifásica pela corrente de Pick-up:

$$M_{51} = \frac{I_{CC_{3f}}}{I_{Pick-up}} \quad (13)$$

3.4.5. Cálculo do tempo de operação do relé de proteção contra sobrecorrente temporizado

O tempo de operação dos relés de proteção deve ser igual ao valor do tempo de operação do relé de retaguarda subtraído de 300 ms, garantindo, assim, a coordenação entre estes relés. Ou matematicamente:

$$T_{op} = T_{opretaguarda} - 0,3 \quad (14)$$

Para os casos em que não se tem o valor do tempo de operação do relé de retaguarda, como nos casos dos relés de proteção da concessionária, deve-se obter os parâmetros do relé utilizado pela concessionária pesquisando-se os mesmos na Ordem de Ajustes de Proteção

(OAP) e calcular o tempo de operação deste relé usando-se a equação (5) apresentada no capítulo 2:

$$T_{op} = DIAL \cdot \frac{\beta}{\left(\frac{I_{cc}}{I_{pick-up}}\right)^\alpha - 1}$$

Para este cálculo, deve-se conhecer os valores do Dial de tempo do relé da concessionária, o tipo de curva utilizado, o valor da corrente de curto circuito, que neste trabalho será obtida via simulação e o valor da corrente de Pick-up deste relé.

3.4.6. Dial de tempo e tempo de operação da função 51 (temporizada)

O tipo de curva adotado para a parametrização de todos os relés implementados neste trabalho é a curva do tipo Muito Inversa, logo, os valores de α e β são 1 e 13,5, respectivamente, conforme Tabela 1.

Diante de todos os parâmetros anteriores já calculados e definidos, pode-se, então, calcular o valor do Dial de tempo para a atuação da função 51 com a seguinte equação:

$$Dial = T_{op} * \frac{(M_{51})^\alpha - 1}{\beta} \quad (15)$$

3.4.7. Cálculo da corrente de ajuste da função 50 (instantânea)

Para o cálculo da corrente de ajuste da função 50, deve-se seguir o seguinte critério:

- 1) A corrente de ajuste da função 50 deve ser igual a um Fator de Segurança (FS_{50}) multiplicado pela corrente de ajuste da função 51.
- 2) Para este trabalho fixou-se um valor para FS_{50} , sendo este igual a 10.

$$I_{ajuste_{50}} = FS_{50} * I_{ajuste_{51}} \quad (16)$$

3.5. Conclusão do capítulo

Neste capítulo mostrou-se o procedimento básico para o cálculo dos ajustes dos relés de proteção contra sobrecorrentes temporizados e instantâneos, podendo-se ver todas as fórmulas necessárias para este fim, e ainda, todos os critérios a serem testados e seguidos. Diante destes procedimentos, é possível dimensionar as proteções contra sobrecorrente da rede

de média tensão de distribuição do Campus do Pici, para que se possa analisar os impactos da inserção da geração distribuída na mesma, que é o foco deste trabalho.

Apresentou-se, ainda, a metodologia aplicada neste trabalho para se modelar a rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici e se calcular os ajustes das proteções de cada trecho desta rede.

Pode-se notar que a ferramenta de simulação utilizada possui os componentes necessários para se modelar o sistema elétrico do Pici, bem como meios de criação dos componentes que não estão presentes em sua biblioteca.

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS DO ESTUDO NO ATP

4.1. Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através da simulação da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici modelada no capítulo 3 deste trabalho, a priori, quando não se tem a inserção de geração distribuída na rede, e posteriormente quando se insere GDs nela, para assim, poder comparar o funcionamento dos relés de proteção diante das duas situações e assim, analisar os impactos da inserção da GD no sistema elétrico do Campus do Pici, que é o foco deste trabalho.

Inicialmente, apresenta-se o cálculo dos ajustes dos relés de proteção, mostrando-se ao final uma tabela resumo com todos os ajustes destes relés. Posteriormente é apresentado a simulação de todo o sistema com todos os relés de proteção parametrizados, a fim de mostrar o sistema parametrizado e coordenado. E por fim, é mostrado a simulação do sistema com a inserção das GDs, mostrando-se quais diferenças esta inserção provoca no funcionamento das proteções do sistema.

4.2. Cálculo dos ajustes dos relés de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo do sistema elétrico de média tensão de distribuição do campus do Pici

4.2.1. Considerações iniciais

Esta seção apresenta a parametrização de todos os relés de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo de todos os trechos da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici. Esta rede é composta por três alimentadores de distribuição, sendo dois deles compostos por dois trechos de distribuição e um por três trechos, somando-se, assim, 7 trechos de distribuição. Além disso, há o trecho que interliga a SED da do Campus do Pici da Enel e a SED do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC). É parametrizado, ainda, os relés de proteção dos lados de alta tensão e baixa tensão do transformador da SED do Campus do Pici.

A rede do Campus do Pici modelada no ATPDraw, onde pode-se observar todos estes trechos citados é mostrada na Figura 43.

Todos os valores de corrente de carga e de curto-circuito trifásico eficazes de todos os trechos da rede de média tensão do Campus Pici, usados para a parametrização dos relés associados a estes trechos, foram abiscoitados da simulação da rede do Pici modelada no ATPDraw no capítulo 3.

Todos os gráficos das correntes de carga e de curto-circuito simulados e mostrados neste capítulo foram obtidos a partir do amperímetro de valor eficaz modelado no capítulo 3, além disso, optou-se por medir apenas a corrente eficaz de uma das fases do circuito.

Todas as simulações foram feitas aplicando-se um curto-circuito no instante de tempo $t = 0,1$ s.

A parametrização de todos os relés de proteção contra sobrecorrente temporizado deste trabalho foi feita escolhendo-se o tipo de curva muito inversa.

4.2.2. Relé de proteção de sobrecorrente da SED do Pici da Enel

Antes de dimensionar as proteções do sistema elétrico do Campus do Pici, é preciso calcular os parâmetros da proteção a montante deste, pois todas as proteções precisam estar coordenadas, para assim, garantir um SEP seletivo, coordenado e confiável.

Os parâmetros do relé de proteção do barramento de 69 kV da subestação do Pici da concessionária de energia elétrica Enel é informado na OAP, disponibilizada pela própria.

Os dados da proteção do referido barramento a seguir foram obtidos da OAP:

- SED: PICI II – PCI_12L9;
- Relação de transformação do TC: 1200 – 5 A;
- Corrente de Pick-up: 1161,6 A;
- Classe de tensão: 69 kV;
- Tipo de curva: Muito inversa;
- Dial de tempo: 0,120.

Tem-se ainda, que o curto-circuito trifásico no barramento a jusante do barramento da SED do Pici da Enel é igual a 15.683,2 A. logo, diante destes dados obtidos consultando-se a OAP e a Tabela 1, calculou-se o tempo de operação do relé neste trecho, onde seu valor é $T_{op} = 0,13$ s

O tempo de atuação do relé da SED do Pici da Enel é de 0,13 segundos, e os relés de proteção de sobrecorrente a jusante, para estarem coordenados com este, devem ter um tempo de atuação menor, com uma margem de tempo igual ou superior a 300 ms, logo, o relé

de proteção do transformador da subestação do Campus do Pici deveria atuar com um tempo de: $T_{opSE_{Pici}} = -0,17 s$

Os relés de proteção contra sobrecorrente não podem ser parametrizados para atuarem em um tempo negativo, isso conclui que as proteções do sistema de distribuição do Campus do Pici não podem ser coordenadas.

Uma solução para essa problemática seria fazer um pedido para a concessionária de energia elétrica mudar os parâmetros da sua proteção, por exemplo, o Dial de tempo, de forma que a sua proteção atue em um tempo em que se possa haver a coordenação com as demais proteções a jusante.

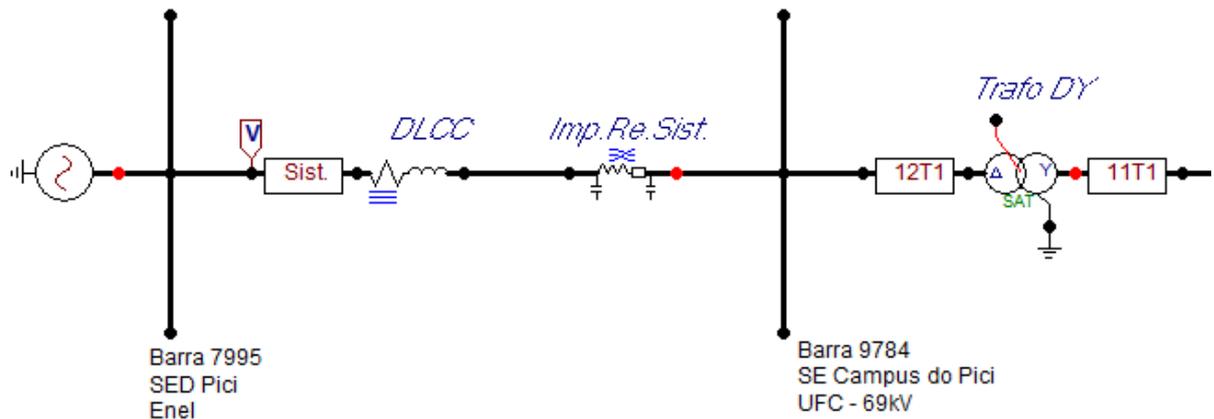
4.2.2.1. Inserção do Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-circuito

Para analisar o impacto da inserção da geração distribuída no sistema elétrico de distribuição do Campus do Pici, foco deste trabalho, adicionou-se um Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-circuito (DLCC) na linha de transmissão de 69 kV, 02L9, que interliga o barramento 7995 da SE Pici da Enel ao barramento de 69 kV, 9784, da SE Campus do Pici. O DLCC tem como objetivo limitar a corrente de curto-circuito trifásico, de forma a garantir uma margem de coordenação que viabilize a coordenação entre o relé do vão de saída da SE da Enel e o relé de entrada de linha da subestação do Campus do Pici.

Seguiu-se a metodologia apresentada em (MONTEIRO, 2005) para o dimensionamento dos parâmetros do DLCC.

Dimensionou-se o DLCC de modo que se tenha uma corrente de curto-circuito trifásico igual a 4932,80 A, visto que esta corrente permite a coordenação entre os relés de proteção, posteriormente, inseriu-se o componente do DLCC no trecho entre os barramentos 7995 da SE do Pici da Enel e o barramento de 69 kV, 9784, conforme mostrado na Figura 44.

Figura 44 – Alimentador da SED do Campus do Pici com a inserção do DLCC

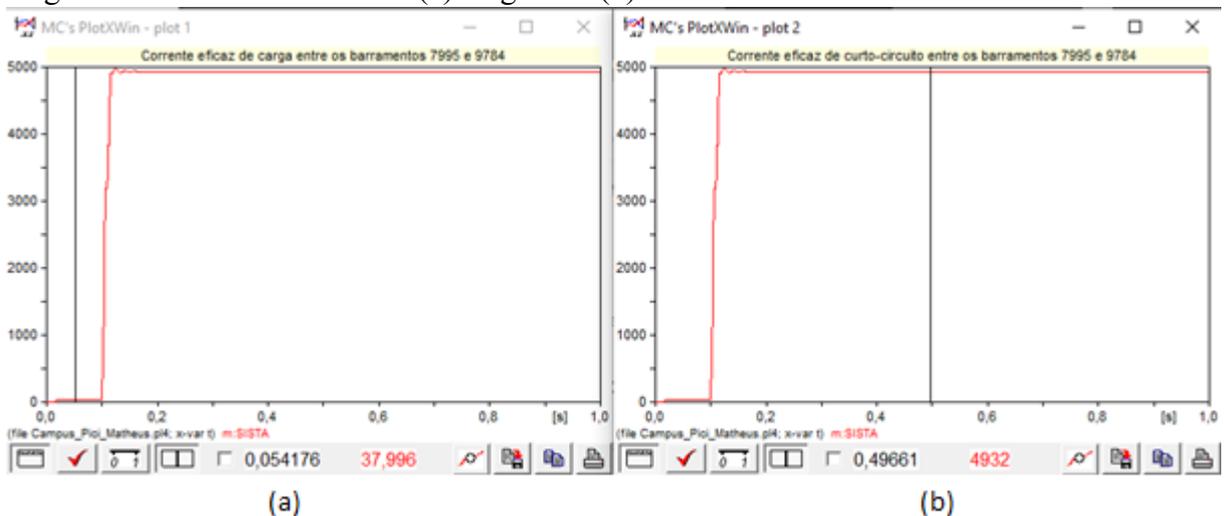


Fonte: O próprio autor (2019)

É mostrado na Figura 45(a) o gráfico da corrente eficaz do trecho entre os barramentos 7995 e 9784, abiscoitada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de carga desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo antes da aplicação do curto-circuito.

É observado na Figura 45(b) o gráfico da corrente eficaz do trecho entre os barramentos 7995 e 9784, abiscoitada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de curto-circuito desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo depois da aplicação do curto-circuito.

Figura 45 – Corrente eficaz de (a) carga e de (b) curto-circuito entre os barramentos 7995 e 9784



Fonte: O próprio autor (2019)

Como aferido da figura, tem-se que $I_{carga} = 37,996 \text{ A}$ e $I_{CC_{3f}} = 4932 \text{ A}$

4.2.2.2. Nova parametrização do relé de proteção de sobrecorrente da SED do Pici da Enel

Diante deste novo valor de corrente de curto-circuito e permanecendo os parâmetros definidos pela OAP, tem-se que o novo tempo de atuação do relé localizado entre os barramentos 7995 e 9784 é $T_{op} = 0,50 s$

Este cálculo mostra que alterando-se o comprimento da linha entre os barramentos 7995 e 9784, o relé de sobrecorrente da SED do Pici da Enel passou a atuar com um tempo de 500 ms, logo, como dito anteriormente, para os relés de sobrecorrente a jusante estarem coordenados, devem ter um tempo de atuação menor, com uma margem de tempo igual ou superior a 300 ms, logo, o relé de proteção do lado de alta tensão do transformador da subestação do Campus do Pici deveria atuar, neste caso, com um tempo de $T_{optrafo} = 0,500 - 0,300 = 0,200 s$, ou seja, 200 ms, o que mostra que esta alteração nos parâmetros da rede do Pici permitiu a coordenação entre os relés de sobrecorrente da mesma.

4.2.3. Relé de proteção de sobrecorrente do transformador do Campus do Pici

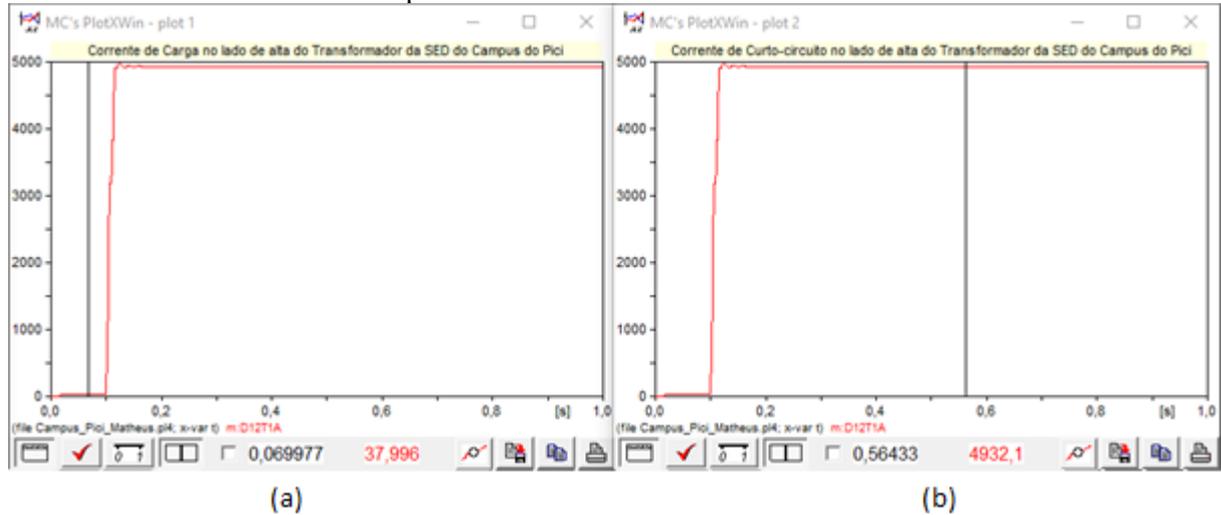
4.2.3.1. Lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici

Como mostrado no item 4.2.2., o relé de sobrecorrente do lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici tem um tempo de operação de 200 ms para um curto-circuito trifásico no lado de alta tensão deste mesmo transformador.

É mostrado na Figura 46(a) o gráfico da corrente eficaz no lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici, lendo-se o valor de carga desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo antes da aplicação do curto-circuito.

É mostrado na Figura 46(b) o gráfico da corrente eficaz no lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici, lendo-se o valor de curto-circuito desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo antes da aplicação do curto-circuito.

Figura 46 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito eficazes no lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici



Fonte: O próprio autor (2019)

Como aferido na figura, tem-se que $I_{carga_{m\acute{a}x}} = 37,996 A$ e $I_{CC_{3f}} = 4932,1 A$. Diante destes valores, pode-se determinar os parâmetros do relé de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo do trecho compreendido entre os barramentos 7995 e 9784 do sistema de distribuição do Campus do Pici.

4.2.3.1.1. Escolha do Transformador de Corrente

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.2., tem-se que $I_{P_{TC}} > 37,996 A$. Já obedecendo-se ao critério 2) da mesma seção, tem-se que $I_{P_{TC}} > 246,61 A$.

Logo, obedecendo-se a todos os critérios concomitantemente, definiu-se um TC com corrente do primário igual a 300 A, logo, o TC utilizado possui relação de transformação 300 – 5 A, podendo-se, então, calcular a Relação de transformação do TC (RTC):

$$RTC = \frac{300}{5} = 60$$

4.2.3.1.2. Cálculo da corrente de ajuste da função 51 (temporizada)

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 4.3.3. e escolhendo-se $F_s = 1,5$ tem-se que a corrente de ajuste da função 51 é $I_{ajuste_{51}} = 0,9499 A$. Aplicando o critério 3) da mesma seção tem-se que $0,9499 \leq 63,28$. Logo, o critério 3) está sendo atendido.

4.2.3.1.3. Cálculo da corrente de Pick-up e do Múltiplo da função 51

O valor da corrente de Pick-up calculado é $I_{Pick-up} = 56,99 A$, e o valor do Múltiplo da função 51 é $M_{51} = 86,54$.

4.2.3.1.4. Dial de tempo e tempo de operação da função 51 (temporizada)

Como o tempo de operação definido para este relé é de 200 ms, o valor calculado do Dial de tempo para este relé de proteção é $Dial = 1,2672$.

4.2.3.1.5. Cálculo da corrente de ajuste da função 50 (instantânea)

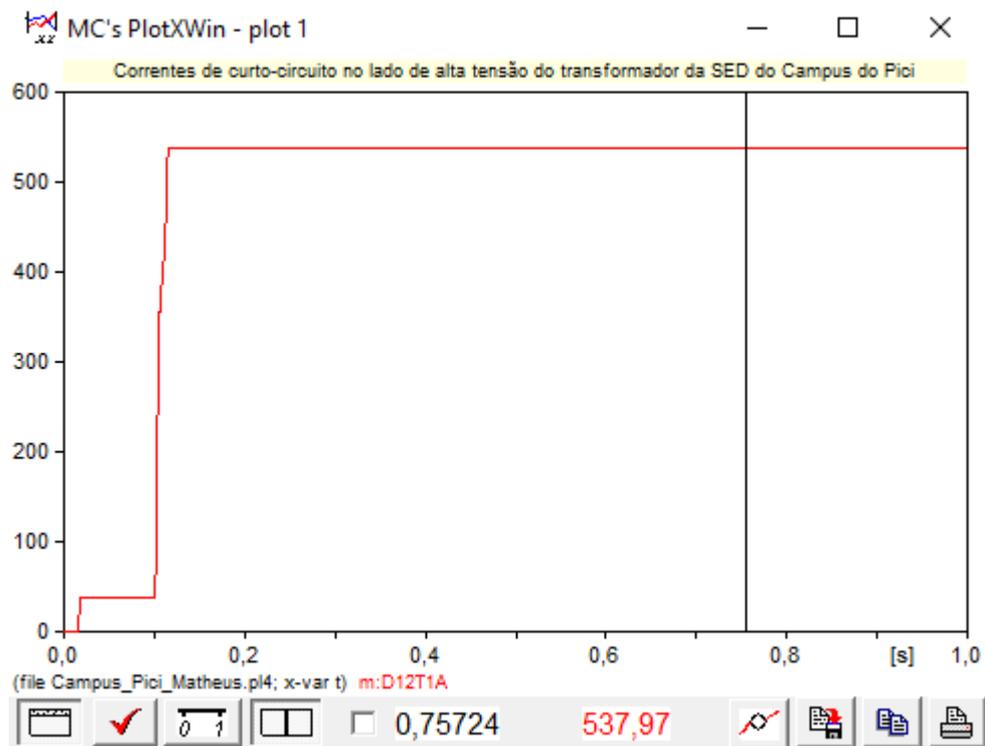
O valor calculado para a corrente de ajuste da função 50 deste relé é $I_{ajuste_{50}} = 9,499 A$.

Com a obtenção de todos os parâmetros da função 51 e da função 50, tem-se então todos os parâmetros bem definidos do relé de proteção, parâmetros estes, que serão carregados no componente do relé de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo no ATPDraw para as simulações dos tempos de atuação dos mesmos.

4.2.3.2. Lado de baixa tensão do transformador da SED do Campus do Pici

O valor eficaz do curto-circuito trifásico no lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici, quando se aplica um curto-circuito trifásico no lado de baixa tensão do mesmo, tem valor igual a 537,97 A, conforme Figura 47.

Figura 47 - Corrente curto-circuito trifásico no lado de alta tensão do transformador da SED do Campus do Pici



Fonte: O próprio autor (2019)

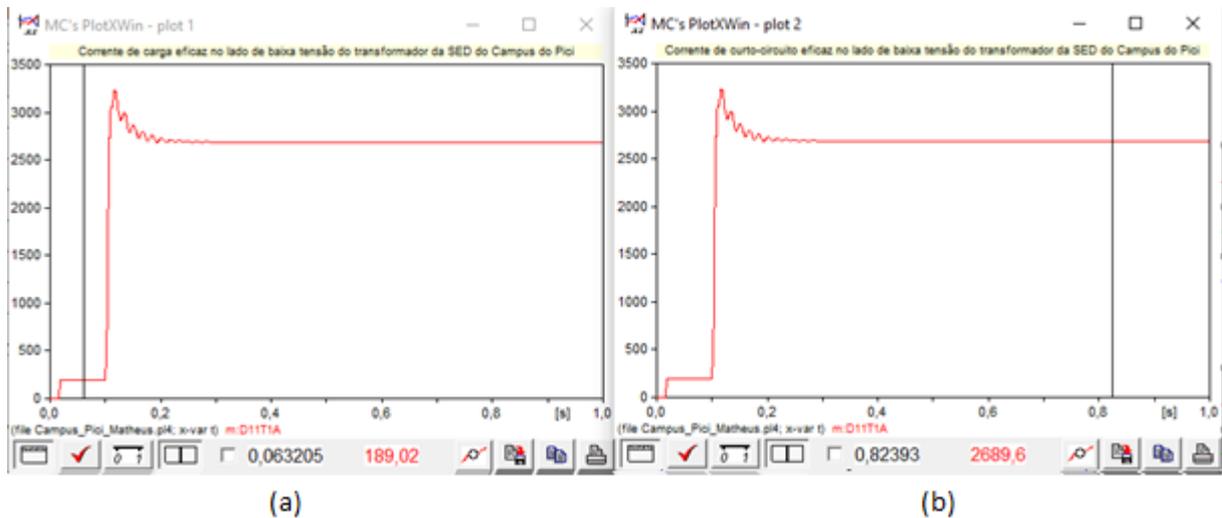
Como pode se observar, $I_{CC_{3f}} = 537,97 \text{ A}$. Diante deste valor de curto-circuito, o valor do Múltiplo da função 51 calculado é $M_{51} = 9,44$. Com isso, o valor do tempo de operação do relé de proteção do lado de alta tensão do deste transformador, quando se tem um curto-circuito trifásico no lado baixa tensão do mesmo é $T_{op} = 2,03 \text{ s}$.

Diante deste valor de tempo de operação, pode-se, então, coordenar este relé do lado de alta tensão com o relé do lado de baixa tensão deste transformador, ou seja, definiu-se um tempo de operação para este último de $T_{op} = 2,03 - 0,30 = 1,73 \text{ s}$.

É mostrado na Figura 48(a) o gráfico da corrente eficaz do lado de baixa tensão do transformador da SED do Campus do Pici, abiscoitada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de carga desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo antes da aplicação do curto-circuito trifásico.

É mostrado na Figura 48(b) o gráfico da corrente eficaz do lado de baixa tensão do transformador da SED do Campus do Pici, abiscoitada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de curto-circuito trifásico desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo depois da aplicação do curto-circuito trifásico.

Figura 48 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito trifásico eficazes no lado de baixa tensão do transformador da SED do Campus do Pici



Fonte: O próprio autor (2019)

Como aferido da figura $I_{carga_{m\acute{a}x}} = 189,02 \text{ A}$ e $I_{CC_{3f}} = 2689,6 \text{ A}$. Diante desses valores, pode-se determinar os parâmetros do relé de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo do lado de baixa tensão do transformador da SED do Campus do Pici.

4.2.3.2.1. Escolha do Transformador de Corrente

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.2., tem-se que $I_{P_{TC}} > 189,02 \text{ A}$. Já obedecendo-se ao critério 2) da mesma seção, tem-se que $I_{P_{TC}} > 134,48 \text{ A}$.

Logo, obedecendo-se a todos os critérios concomitantemente, definiu-se um TC com corrente do primário igual a 300 A. Logo, o TC utilizado possui relação de transformação 300 – 5 A, podendo-se, então, calcular a Relação de transformação do TC (RTC):

$$RTC = \frac{300}{5} = 60$$

4.2.3.2.2. Cálculo da corrente de ajuste da função 51 (temporizada)

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.3. e escolhendo-se $F_s = 1,5$ tem-se que a corrente de ajuste da função 51 é $I_{ajuste_{51}} = 4,73 A$. Aplicando o critério 3) da mesma seção tem-se que $4,73 \leq 34,51$. Logo, o critério 3) está sendo atendido.

4.2.3.2.3. Cálculo da corrente de Pick-up e do Múltiplo da função 51

O valor da corrente de Pick-up calculado é $I_{pick-up} = 283,80 A$, e o valor do Múltiplo da função 51 é $M_{51} = 9,48$.

4.2.3.2.4. Dial de tempo e tempo de operação da função 51 (temporizada)

Como o tempo de operação definido para este relé é de $1,73 s$, o valor calculado do Dial de tempo para este relé de proteção é $Dial = 1,0863$.

4.2.3.2.5. Cálculo da corrente de ajuste da função 50 (instantânea)

O valor calculado para a corrente de ajuste da função 50 deste relé é $I_{ajuste_{50}} = 47,3 A$

Com a obtenção de todos os parâmetros da função 51 e da função 50, tem-se então todos os parâmetros bem definidos do relé de proteção, parâmetros estes, que serão carregados no componente do relé de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo no ATPDraw para as simulações dos tempos de atuação dos mesmos.

4.2.4. Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho A

É possível fazer a coordenação do relé de proteção contra sobrecorrente do Trecho A com o relé de proteção contra sobrecorrente do lado de baixa tensão do transformador da SED do campus do Pici, pois este possui um tempo de operação alto, igual a $2,04 s$ para um curto-circuito trifásico no barramento A que pode ser visto na Figura 42, atendendo a margem de tempo necessária para a coordenação, que é no mínimo $300 ms$.

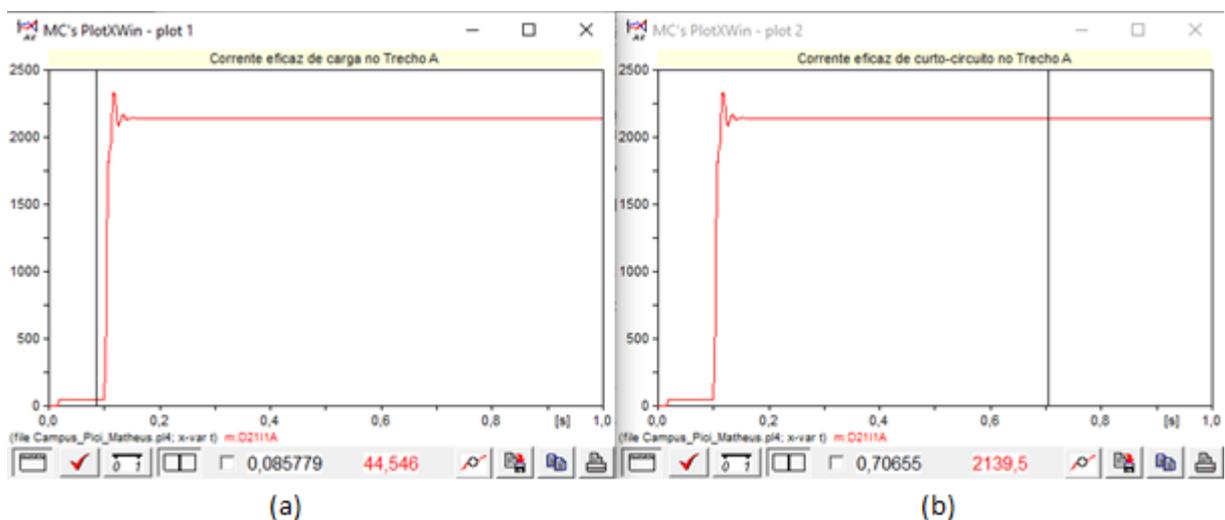
O cálculo do tempo de operação do relé de proteção do lado de baixa tensão do transformador da SED do Campus do Pici para um curto-circuito trifásico no barramento A é feito da mesma forma que se calculou o tempo de operação do relé do lado de alta tensão para um curto-circuito trifásico no lado de baixa tensão neste mesmo transformador, descrito no item 4.2.3.1.

Preferiu-se não subtrair 300 ms do tempo de operação do relé a montante, como tem-se feito anteriormente, pois o relé do Trecho A atuaria com um tempo muito longo, então, definiu-se um tempo de operação para este relé igual a 450 ms, para um curto-circuito trifásico no barramento a jusante (barramento D), este tempo ainda permite a coordenação entre os relés, pois neste caso, a diferença de tempos de operação entre este relé e o relé a montante é maior que 300 ms.

É mostrado na Figura 49(a) o gráfico da corrente eficaz do Trecho A, quando se aplica um curto-circuito trifásico no barramento D, abiscoitada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de carga desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo antes da aplicação do curto-circuito.

É mostrado na Figura 49(b) o gráfico da corrente eficaz do Trecho A, quando se aplica um curto-circuito trifásico no barramento D, abiscoitada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de curto-circuito trifásico desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo depois da aplicação do curto-circuito trifásico.

Figura 49 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito eficazes no Trecho A



Fonte: O próprio autor (2019)

Como aferido da figura, $I_{carga_{m\acute{a}x}} = 44,546 \text{ A}$ e $I_{CC_{3f}} = 2139,5 \text{ A}$. Diante desses valores, pode-se determinar os parâmetros do relé de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo do Trecho A.

4.2.4.1. Escolha do Transformador de Corrente

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.2., tem-se que $I_{P_{TC}} > 44,546 \text{ A}$. Já obedecendo-se ao critério 2) da mesma seção, tem-se que $I_{P_{TC}} > 106,98 \text{ A}$.

Logo, obedecendo-se a todos os critérios concomitantemente, definiu-se um TC com corrente do primário igual a 150 A. Logo, o TC utilizado possui relação de transformação 150 – 5 A, podendo-se, então, calcular a Relação de transformação do TC (RTC):

$$RTC = \frac{150}{5} = 30$$

4.2.4.2. Cálculo da corrente de ajuste da função 51 (temporizada)

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.3. e escolhendo-se $F_s = 1,5$ tem-se que a corrente de ajuste da função 51 é $I_{ajuste_{51}} = 2,2273 \text{ A}$. Aplicando o critério 3) da mesma seção tem-se que $2,2273 \leq 54,90$. Logo, o critério 3) está sendo atendido.

4.2.4.3. Cálculo da corrente de Pick-up e do Múltiplo da função 51

O valor da corrente de Pick-up calculado é $I_{pick-up} = 66,82 \text{ A}$, e o valor do Múltiplo da função 51 é $M_{51} = 32,02$.

4.2.4.4. Dial de tempo e tempo de operação da função 51 (temporizada)

Como o tempo de operação defino para este relé é de 450 ms, o valor calculado do Dial de tempo para este relé de proteção é $Dial = 1,0340$.

4.2.4.5. Cálculo da corrente de ajuste da função 50 (instantânea)

O valor calculado para a corrente de ajuste da função 50 deste relé é $I_{ajuste_{50}} = 22,273 A$.

Com a obtenção de todos os parâmetros da função 51 e da função 50, tem-se então todos os parâmetros bem definidos do relé de proteção, parâmetros estes, que serão carregados no componente do relé de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo no ATPDraw para as simulações dos tempos de atuação dos mesmos.

4.2.5. Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho B

A parametrização do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo do Trecho B é muito similar a parametrização feita para o relé de proteção do Trecho A no item 4.2.4., tendo-se inclusive, o mesmo tempo de operação. Diante disso, não se mostrará a parametrização deste relé, apresenta-se posteriormente apenas uma tabela com os dados das parametrizações de todos os relés do sistema inteiro de distribuição de média tensão do Campus do Pici.

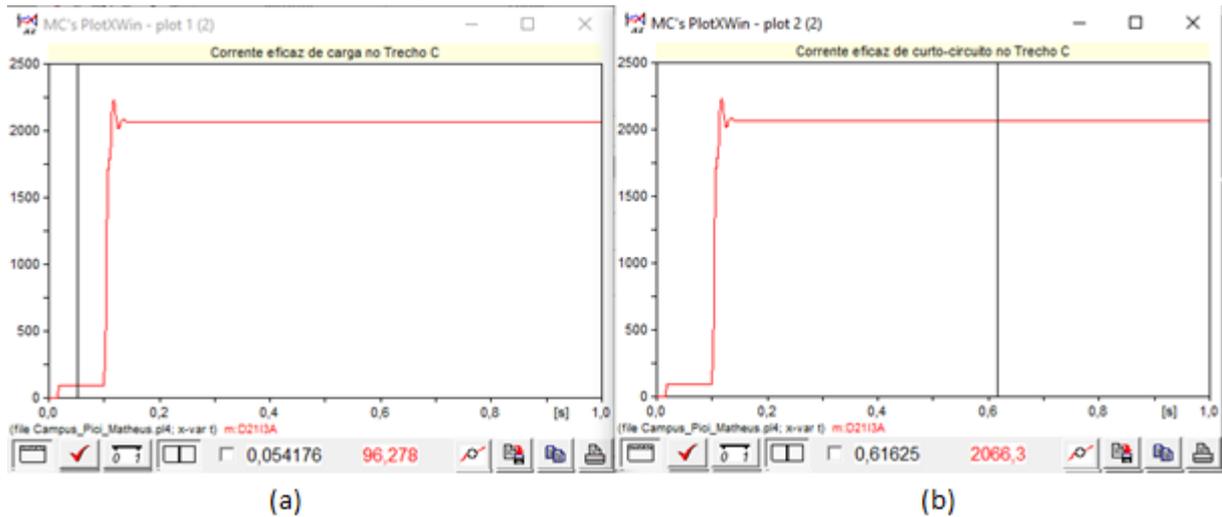
4.2.6. Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho C

Assim como feito para o Trecho A no item 4.2.4., preferiu-se não se subtrair 300 ms do tempo de operação do relé a montante, pois o relé do Trecho C atuaria com um tempo muito longo, então, definiu-se um tempo de operação para este relé igual a 800 ms, para um curto-circuito trifásico no barramento G, este tempo ainda permite a coordenação entre os relés, pois neste caso, a diferença de tempos de operação entre este relé e o relé a montante é maior que 300 ms.

É mostrado na Figura 50(a) o gráfico da corrente eficaz do Trecho C, quando se aplica um curto-circuito trifásico no barramento G, abiscoitada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de carga desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo antes da aplicação do curto-circuito.

É mostrado na Figura 50(b) o gráfico da corrente eficaz do Trecho C, quando se aplica um curto-circuito trifásico no barramento G, abiscoitada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de curto-circuito trifásico desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo depois da aplicação do curto-circuito.

Figura 50 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito trifásico eficazes no Trecho C



Fonte: O próprio autor (2019)

Como aferido na figura, $I_{carga_{m\acute{a}x}} = 96,278 \text{ A}$ e $I_{CC_{3f}} = 2066,3 \text{ A}$. Diante desses valores, pode-se determinar os parâmetros do relé de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo do Trecho C.

4.2.6.1. Escolha do Transformador de Corrente

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.2., tem-se que $I_{P_{TC}} > 96,278 \text{ A}$. Já obedecendo-se ao critério 2) da mesma seção, tem-se que $I_{P_{TC}} > 103,32 \text{ A}$.

Logo, obedecendo-se a todos os critérios concomitantemente, definiu-se um TC com corrente do primário igual a 150 A. Logo, o TC utilizado possui relação de transformação 150 – 5 A, podendo-se, então, calcular a Relação de transformação do TC (RTC):

$$RTC = \frac{150}{5} = 30$$

4.2.6.2. Cálculo da corrente de ajuste da função 51 (temporizada)

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.3. e escolhendo-se $F_s = 1,5$ tem-se que a corrente de ajuste da função 51 é $I_{ajuste_{51}} = 4,8139 \text{ A}$. Aplicando o critério 3) da mesma seção tem-se que $4,8139 \leq 53,02$. Logo, o critério 3) está sendo atendido.

4.2.6.3. Cálculo da corrente de Pick-up e do Múltiplo da função 51

O valor da corrente de Pick-up calculado é $I_{pick-up} = 144,42 A$, e o valor do Múltiplo da função 51 é $M_{51} = 14,31$.

4.2.6.4. Dial de tempo e tempo de operação da função 51 (temporizada)

Como o tempo de operação definido para este relé é de 800 ms, o valor calculado do Dial de tempo para este relé de proteção é $Dial = 0,7886$.

4.2.6.5. Cálculo da corrente de ajuste da função 50 (instantânea)

O valor calculado para a corrente de ajuste da função 50 deste relé é $I_{ajuste_{50}} = 48,139 A$.

Com a obtenção de todos os parâmetros da função 51 e da função 50, tem-se então todos os parâmetros bem definidos do relé de proteção, parâmetros estes, que serão carregados no componente do relé de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo no ATPDraw para as simulações dos tempos de atuação dos mesmos.

4.2.7. Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho D

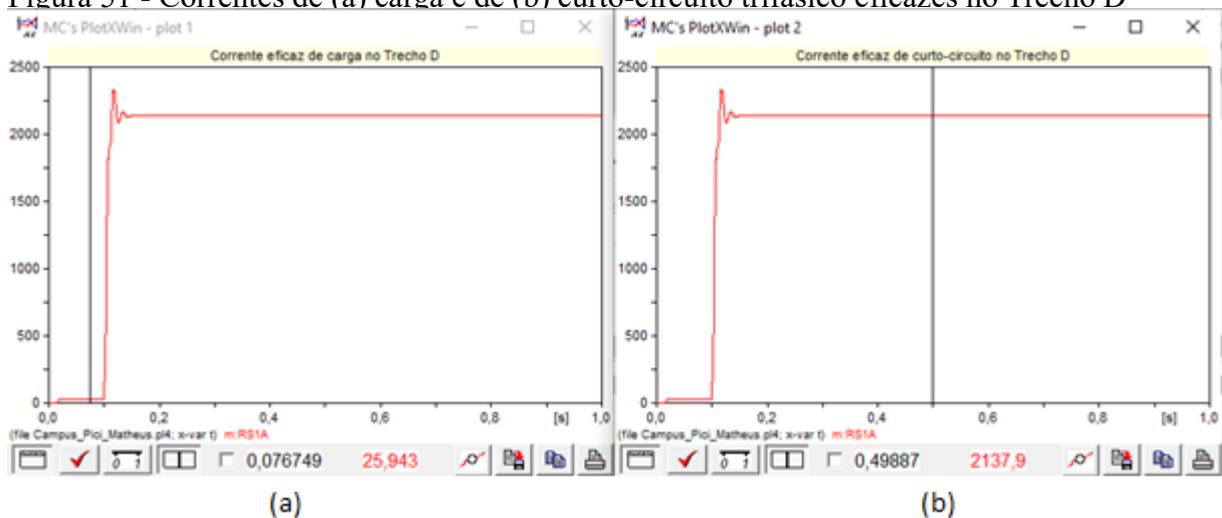
Tem-se que o tempo de operação do relé de proteção do Trecho A, para um curto-circuito trifásico no barramento D é de 450 ms, como mostrado no item 4.2.4., logo, para haver coordenação entre os relés, definiu-se o tempo de operação do relé de proteção do Trecho D, para um curto-circuito trifásico neste mesmo trecho igual a 150 ms, visto que $T_{op} = 0,45 - 0,30 = 0,15 s$.

É mostrado na Figura 51(a) o gráfico da corrente eficaz do Trecho D, quando se aplica um curto-circuito trifásico no barramento D, abiscotada a partir da simulação no ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de carga desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo antes da aplicação do curto-circuito.

É mostrado na Figura 51(b) o gráfico da corrente eficaz do Trecho D, quando se aplica um curto-circuito trifásico no barramento D, abiscotada a partir da simulação no

ATPDraw da rede do Pici, lendo-se o valor de curto-circuito trifásico desta corrente, pois mediu-se seu valor no instante de tempo depois da aplicação do curto-circuito trifásico.

Figura 51 - Correntes de (a) carga e de (b) curto-circuito trifásico eficazes no Trecho D



Fonte: O próprio autor (2019)

Como aferido na figura, $I_{carga_{m\acute{a}x}} = 25,943 \text{ A}$ e $I_{CC_{3f}} = 2137,9 \text{ A}$. Diante desses valores, pode-se determinar os parâmetros do relé de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo do Trecho D.

4.2.7.1. Escolha do Transformador de Corrente

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.2., tem-se que $I_{P_{TC}} > 25,943 \text{ A}$. Já obedecendo-se ao critério 2) da mesma seção, tem-se que $I_{P_{TC}} > 106,90 \text{ A}$.

Logo, obedecendo-se a todos os critérios concomitantemente, definiu-se um TC com corrente do primário igual a 150 A. Logo, o TC utilizado possui relação de transformação 150 – 5 A, podendo-se, então, calcular a Relação de transformação do TC (RTC):

$$RTC = \frac{150}{5} = 30$$

4.2.7.2. Cálculo da corrente de ajuste da função 51 (temporizada)

Obedecendo-se ao critério 1) da seção 3.4.3. e escolhendo-se $F_s = 1,5$ tem-se que a corrente de ajuste da função 51 é $I_{a_{juste_{51}}} = 1,2972 \text{ A}$. Aplicando o critério 3) da mesma seção tem-se que $1,2972 \leq 54,86$. Logo, o critério 3) está sendo atendido.

4.2.7.3. Cálculo da corrente de Pick-up e do Múltiplo da função 51

O valor da corrente de Pick-up calculado é $I_{Pick-up} = 38,92 A$, e o valor do Múltiplo da função 51 é $M_{51} = 54,94$.

4.2.7.4. Dial de tempo e tempo de operação da função 51 (temporizada)

Como o tempo de operação definido para este relé é de 150 ms, o valor calculado do Dial de tempo para este relé de proteção é $Dial = 0,5993$.

4.2.7.5. Cálculo da corrente de ajuste da função 50 (instantânea)

O valor calculado para a corrente de ajuste da função 50 deste relé é $I_{ajuste_{50}} = 12,972 A$.

Com a obtenção de todos os parâmetros da função 51 e da função 50, tem-se então todos os parâmetros bem definidos do relé de proteção, parâmetros estes, que serão carregados no componente do relé de proteção de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo no ATPDraw para as simulações dos tempos de atuação dos mesmos.

4.2.8. Relé de proteção de sobrecorrente dos Trecho E

A parametrização do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo do Trecho E é muito similar a parametrização feita para o relé de proteção do Trecho D no item 4.2.7., tendo-se inclusive, o mesmo tempo de operação. Diante disso, não se mostrará a parametrização deste relé, apresenta-se posteriormente apenas uma tabela com os dados das parametrizações de todos os relés do sistema inteiro de distribuição de média tensão do Campus do Pici.

4.2.9. Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho F

A parametrização do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo do Trecho F é muito similar a parametrização feita para o relé de proteção do Trecho A, no item

4.2.4., tendo-se inclusive, o mesmo tempo de operação. Diante disso, não se mostrará a parametrização deste relé, apresenta-se posteriormente apenas uma tabela com os dados das parametrizações de todos os relés do sistema inteiro de distribuição de média tensão do Campus do Pici.

4.2.10. Relé de proteção de sobrecorrente do Trecho G

A parametrização do relé de sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo do Trecho G é muito similar a parametrização feita para o relé de proteção do Trecho D, no item 2.4.7., tendo-se inclusive, o mesmo tempo de operação. Diante disso, não se mostrará a parametrização deste relé, apresenta-se posteriormente apenas uma tabela com os dados das parametrizações de todos os relés do sistema inteiro de distribuição de média tensão do Campus do Pici.

4.2.11. Considerações finais

Este capítulo mostrou a parametrização de todos os relés de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo de todos os trechos da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici.

Pôde-se ver que, para o sistema real da rede de distribuição do Campus do Pici, não é possível haver a coordenação entre os relés de proteção da UFC com o relé de proteção da Enel, para se poder parametrizar os relés de proteção desta rede e, assim, poder verificar os impactos da inserção da geração distribuída, decidiu-se alterar os parâmetros da rede do Pici, aumentando-se o comprimento da linha que interliga os barramentos 7995 e 9784.

Com esta mudança, todos os relés de proteção foram bem parametrizados e pode-se haver a coordenação entre os mesmos.

A Tabela 6 mostra os dados da parametrização de todos os relés de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo da rede de distribuição de média tensão do Campus do Pici modelado no ATPDraw mostrada na Figura 42.

Tabela 6 - Dados da parametrização dos relés de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici

TRECHO	Icarga (A)	Icc3f (A)	Top (s)	RTC	Iajuste51 (A)	Ipick-up (A)	Múltiplo	Dial	Iajuste50 (A)
Imp.Re.Sist	38,00	4932,80	0,50	240,00	4,84	1161,60	4,25	0,12	48,40
Trafo alta	38,00	537,97	2,03	60,00	0,95	56,99	9,44	1,27	9,50
Trafo baixa	189,20	2689,60	1,73	60,00	4,73	283,80	9,48	1,09	47,30
A	44,55	2139,50	0,45	30,00	2,23	66,82	32,02	1,03	22,27
B	48,19	2076,90	0,45	30,00	2,41	72,29	28,73	0,92	24,10
C	96,28	2066,30	0,80	30,00	4,81	144,42	14,31	0,79	48,14
D	25,94	2137,90	0,15	30,00	1,30	38,92	54,94	0,60	12,97
E	19,16	2074,20	0,15	30,00	1,00	30,00	69,14	0,76	10,00
F	87,01	2065,00	0,50	30,00	4,35	130,52	15,82	0,55	43,51
G	35,20	2060,40	0,20	30,00	1,76	52,80	39,02	0,56	17,60

Fonte: O próprio autor (2019)

4.3. Simulação do curto-circuito trifásico no sistema de distribuição de média tensão do Campus do Pici com todos os relés de proteção parametrizados e sem geração distribuída inserida na rede

4.3.1. Considerações iniciais

Esta seção apresenta a simulação da atuação dos relés de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici com todos estes relés de proteção parametrizados e inseridos na rede. Com estes relés parametrizados e inseridos na rede, pode-se simular uma falha em um barramento específico e assim verificar o tempo de atuação destes relés, podendo-se, ainda, verificar a margem de tempo de atuação entre os relés adjacentes e conferir se os mesmos estão coordenados.

Simulou-se, neste capítulo, três curtos-circuitos trifásicos, localizados no último barramento de cada alimentador, verificou-se o tempo de atuação de cada relé de proteção principal e os tempos de atuação dos relés de retaguarda. Para isto, teve-se que desabilitar os relés de proteção principais, isso indica que houve uma falha na atuação deste relé.

Para se fazer estas simulações dos tempos de atuação dos relés de proteção contra sobrecorrentes temporizado, desabilitou-se a função 50 (instantânea) de todos os relés de proteção de todos os trechos, aumentando-se as correntes de ajustes dos mesmos, como pode-se ver nas figuras presentes no apêndice B, pois caso se deixasse habilitada esta função, a

mesma sempre atuaria no caso da ocorrência de uma falta, impossibilitando, assim, de se analisar o tempo de atuação dos relés, visto que os mesmos atuariam instantaneamente. Além disso, também pode-se notar que o valor da corrente de ajuste da função 51 do relé de proteção do Trecho E está igual a 1, isso porque a modelagem do componente do relé de proteção no ATPDraw só permite valores acima de 1 para a corrente de ajuste da função 51.

Diferentemente do que vinha sendo feito anteriormente, as simulações deste capítulo foram feitas obtendo-se as três correntes de fase de cada circuito, para que se pudesse ter uma melhor visualização da falta e da atuação do relé de proteção. Isso permite, também, verificar se as correntes de curto-circuito trifásico em todas as fases são eliminadas pelo relé de proteção.

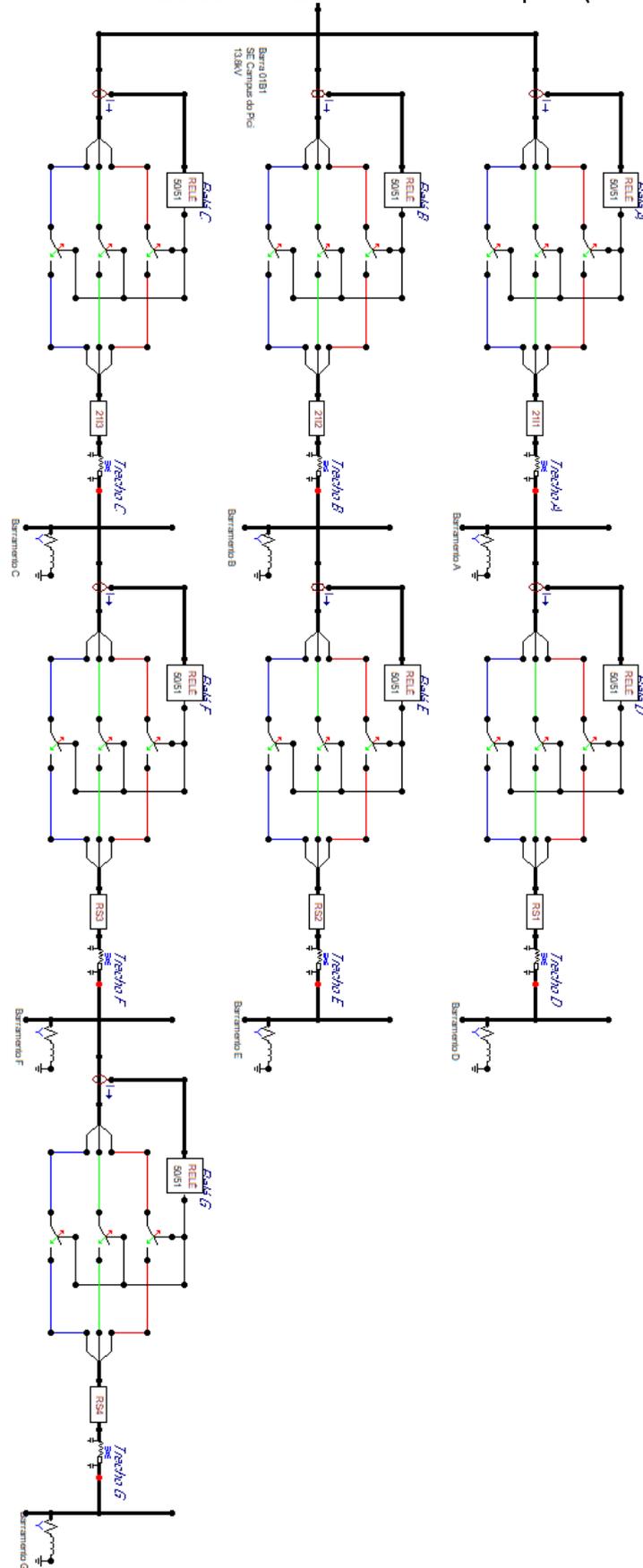
Todas as simulações foram feitas aplicando-se um curto-circuito no instante de tempo $t = 0,1$ s.

Os parâmetros inseridos em todos os relés de proteção contra sobrecorrente temporizado com ajuste instantâneo de todos os trechos são mostrados nas figuras presentes no apêndice B, onde pode-se ver todos dados de entrada de cada componente também pode-se ratificar que todos os relés foram modelados conforme os dados calculados e presentes na Tabela 6.

4.3.2. Rede do Pici com todos os relés de proteção parametrizados

Diante da parametrização de todos os relés de proteção de toda a rede do Campus do Pici, adicionou-se em cada trecho dos alimentadores seus respectivos relés de proteção, e carregou-se nos mesmos cada valor de entrada definida na seção 4.2, deixando, assim, todos os relés parametrizados, como mostrada na Figura 52.

Figura 52 - Rede de Média Tensão do Campus do Pici modelada no ATPDraw com todos os relés de proteção



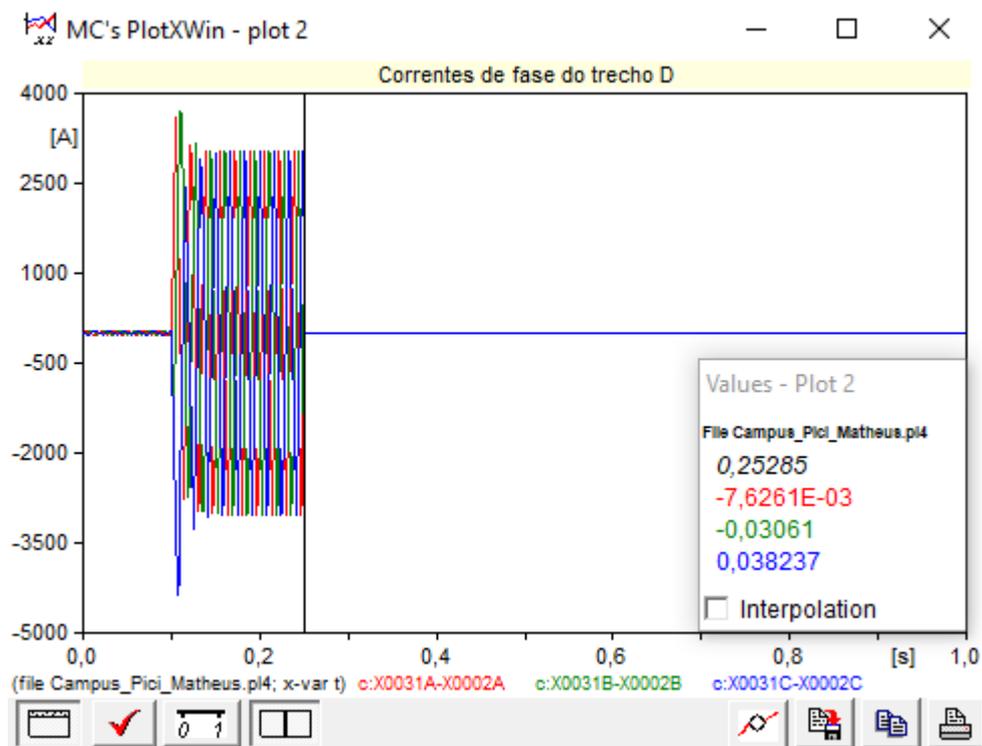
Fonte: O próprio autor (2019)

4.3.3. Simulação da falha no barramento D

4.3.3.1. Curto-circuito no barramento D com todos os relés de proteção habilitados

É mostrado na Figura 53 as correntes de fase do Trecho D, ao se aplicar um curto-circuito trifásico no barramento D no instante de tempo $t = 0,1$ s.

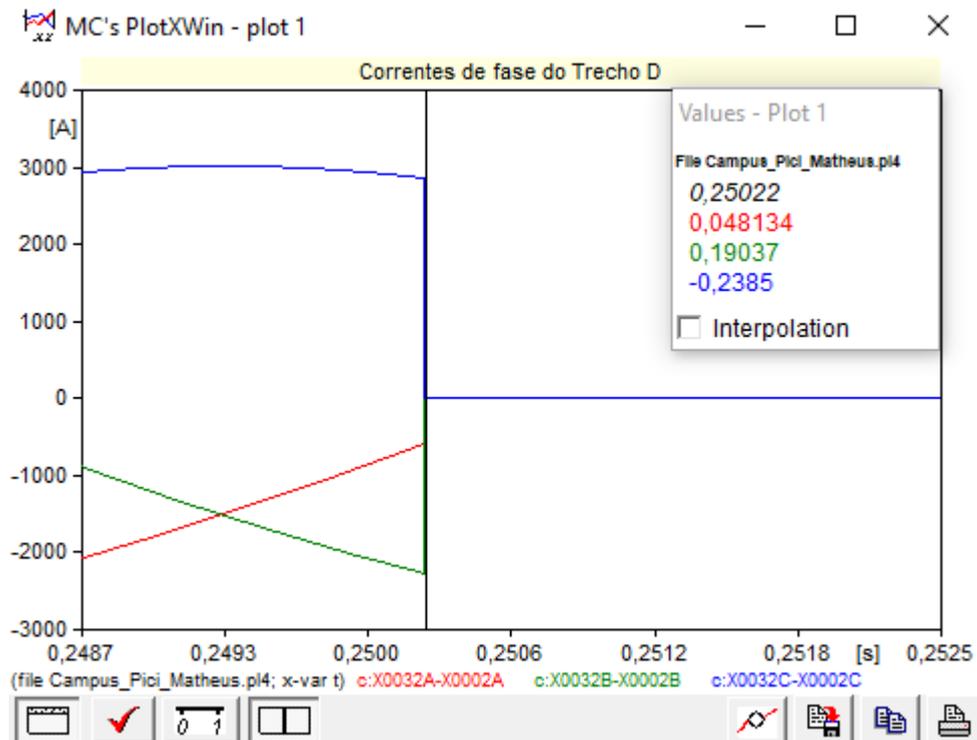
Figura 53 - Correntes de fase do Trecho D



Fonte: O próprio autor (2019)

Como o ATPDraw está mostrando 1 segundo de simulação, este valor de tempo de operação do relé não é muito preciso, pois não se pode garantir que o valor obtido no gráfico se refere realmente ao instante de tempo em que se se corta a corrente de curto-circuito. Diante disso, com a ferramenta zoom do ATPDraw, ampliou-se o gráfico nas proximidades do instante de tempo em que o relé de proteção atua, conforme Figura 54.

Figura 54 - Zoom no instante de tempo em que o relé de proteção atua



Fonte: O próprio autor (2019)

O relé de proteção do Trecho D atuou e eliminou a falha no instante de tempo $t = 0,25022$ s, como o curto-circuito trifásico acontece no instante de tempo $t = 0,1$ s, o tempo de atuação do relé de proteção é:

$$T_{opD} = 0,25022 - 0,1 = 0,15022 \text{ s}$$

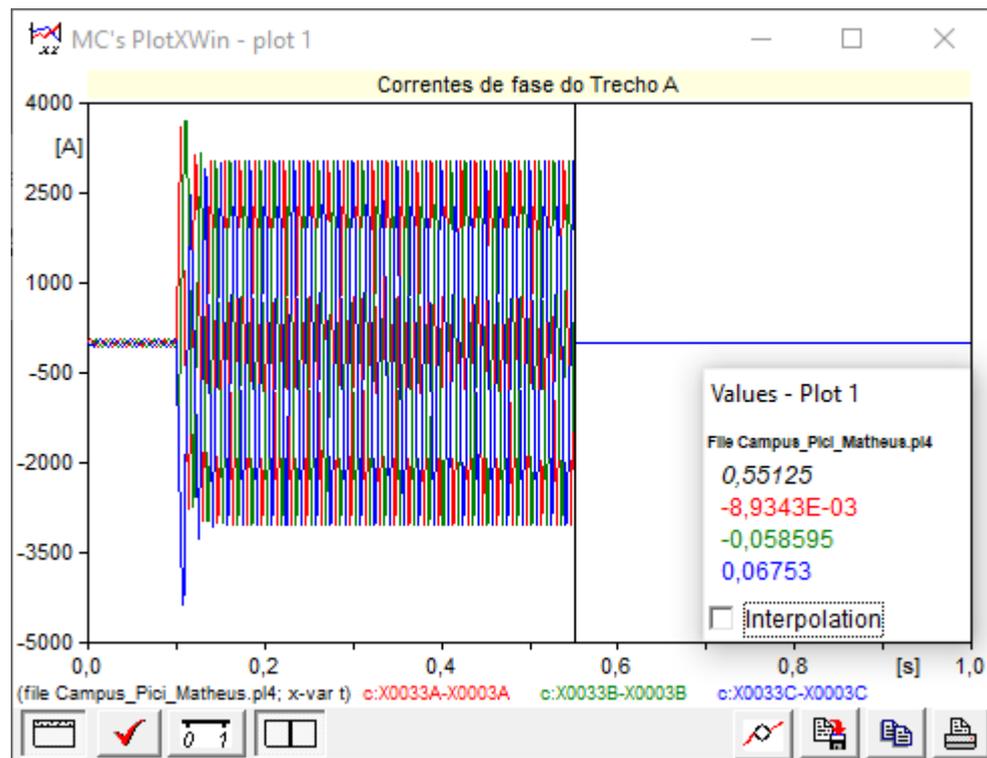
Ou seja, o relé de proteção do Trecho D teve um tempo de atuação muito próximo de 150 ms, conforme dimensionado.

4.3.3.2. Curto-circuito no barramento D com falha do relé de proteção do trecho D

Para se simular a falha do relé de proteção do Trecho D, desabilitou-se o mesmo no ATPDraw para que se pudesse ver o tempo de atuação do relé de proteção do Trecho A, quando se tem esta referida falha no componente.

É observado na Figura 55 as correntes de fase do Trecho A, ao se aplicar um curto-circuito trifásico no barramento D no instante de tempo $t = 0,1$ s.

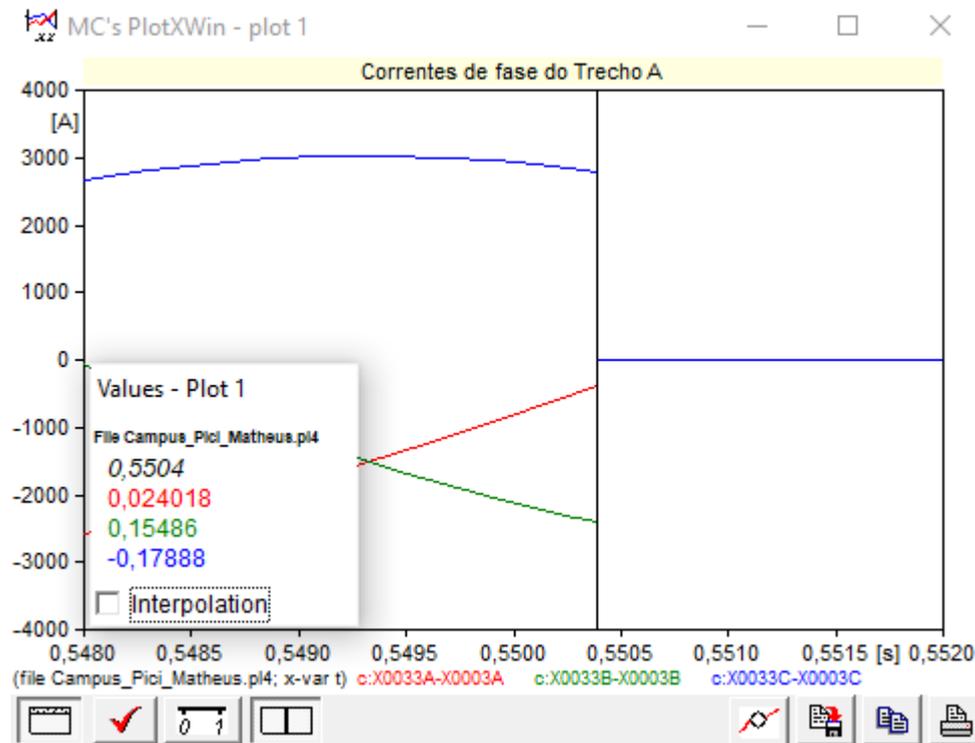
Figura 55 - Correntes de fase do Trecho A



Fonte: O próprio autor (2019)

Como o ATPDraw está mostrando 1 segundo de simulação, este valor de tempo de operação do relé não é muito preciso, pois não se pode garantir que o valor obtido no gráfico se refere realmente ao instante de tempo em que se se corta a corrente de curto-circuito. Diante disso, com a ferramenta zoom do ATPDraw, ampliou-se o gráfico nas proximidades do instante de tempo em que o relé de proteção atua, conforme Figura 56.

Figura 56 - Zoom no instante de tempo em que o relé de proteção atua



Fonte: O próprio autor (2019)

O relé de proteção do Trecho A atuou e eliminou a falha no instante de tempo $t = 0,55040$ s, como o curto-circuito trifásico acontece no instante de tempo $t = 0,1$ s, o tempo de atuação do relé de proteção é:

$$T_{opA} = 0,55040 - 0,1 = 0,45040 \text{ s}$$

Ou seja, o relé de proteção do Trecho A teve um tempo de atuação muito próximo de 450 ms, conforme dimensionado.

4.3.3.3. Coordenação entre os relés de proteção

Para se ratificar que há a coordenação entre os relés de proteção, a diferença entre os tempos de operação dos relés de proteção do Trecho A e Trecho D deve ser igual ou superior a 300 ms.

$$T_{opA} - T_{opD} = 0,45040 - 0,15022 = 0,30018 \text{ s}$$

Ou seja, isso mostra que os relés de proteção contra sobrecorrente temporizados do Trecho A e do Trecho D estão coordenados, pois a diferença entre os tempos de atuação dos mesmos é aproximadamente igual a 300 ms.

4.3.4. Simulação da falha em todos os barramentos

As simulações das faltas nos outros barramentos dos outros alimentadores foram feitas da mesma forma que descrito no item 4.3.3., ou seja, aplicou-se um curto-circuito trifásico no último do alimentador, e simulou-se os tempos de atuação de cada relé de proteção do referido alimentador, e posteriormente, calculou-se as margens de tempo de operação destas proteções, para se verificar se as mesmas estão coordenadas ou não.

O resumo das simulações e resultados dos tempos de atuação dos relés de proteção de todos os alimentadores é apresentado na Tabela 7, em que se nota que todos os relés de proteção da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici estão coordenados.

Tabela 7 - Tempo de Operação e Margens de tempo dos relés de proteção

TRECHO A		TRECHO D		
Tempo de Operação	Margem de Tempo	Tempo de Operação		
0,4504	0,30018	0,15022		
TRECHO B		TRECHO E		
Tempo de Operação	Margem de Tempo	Tempo de Operação		
0,45038	0,30013	0,15025		
TRECHO C		TRECHO F		TRECHO G
Tempo de Operação	Margem de Tempo	Tempo de Operação	Margem de Tempo	Tempo de Operação
0,80122	0,3004	0,50082	0,30057	0,20025

Fonte: O próprio autor (2019)

4.4. Simulação do curto-circuito trifásico no sistema de distribuição de média tensão do Campus do Pici com todos os relés de proteção parametrizados e com geração distribuída inserida na rede

4.4.1. Considerações iniciais

Esta seção apresenta a simulação da atuação dos relés de proteção contra sobrecorrente temporizados com ajuste instantâneo da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici com a inserção de gerações distribuídas na rede. As simulações são feitas de

maneira análoga as feitas na seção 4.3., logo, as mesmas permitem verificar o tempo de atuação dos relés de proteção, podendo-se, ainda, verificar a margem de tempo de atuação entre os relés adjacentes e conferir se os mesmos estão coordenados.

Simulou-se, neste capítulo, três curtos-circuitos trifásicos, localizados no último barramento de cada alimentador, verificou-se o tempo de atuação de cada relé de proteção principal e os tempos de atuação dos relés de retaguarda. Para isto, teve-se que desabilitar os relés de proteção principais, isso indica que houve uma falha na atuação deste relé.

Para se fazer estas simulações dos tempos de atuação dos relés de proteção contra sobrecorrentes temporizado, também teve-se que desabilitar a função 50 (instantânea) de todos os relés de proteção de todos os trechos, aumentando-se as correntes de ajustes dos mesmos, como pode-se ver nas figuras presentes no apêndice B, pois caso se deixasse habilitada esta função, a mesma sempre atuaria no caso da ocorrência de uma falta, impossibilitando, assim, de se analisar o tempo de atuação dos relés, visto que os mesmos atuariam instantaneamente.

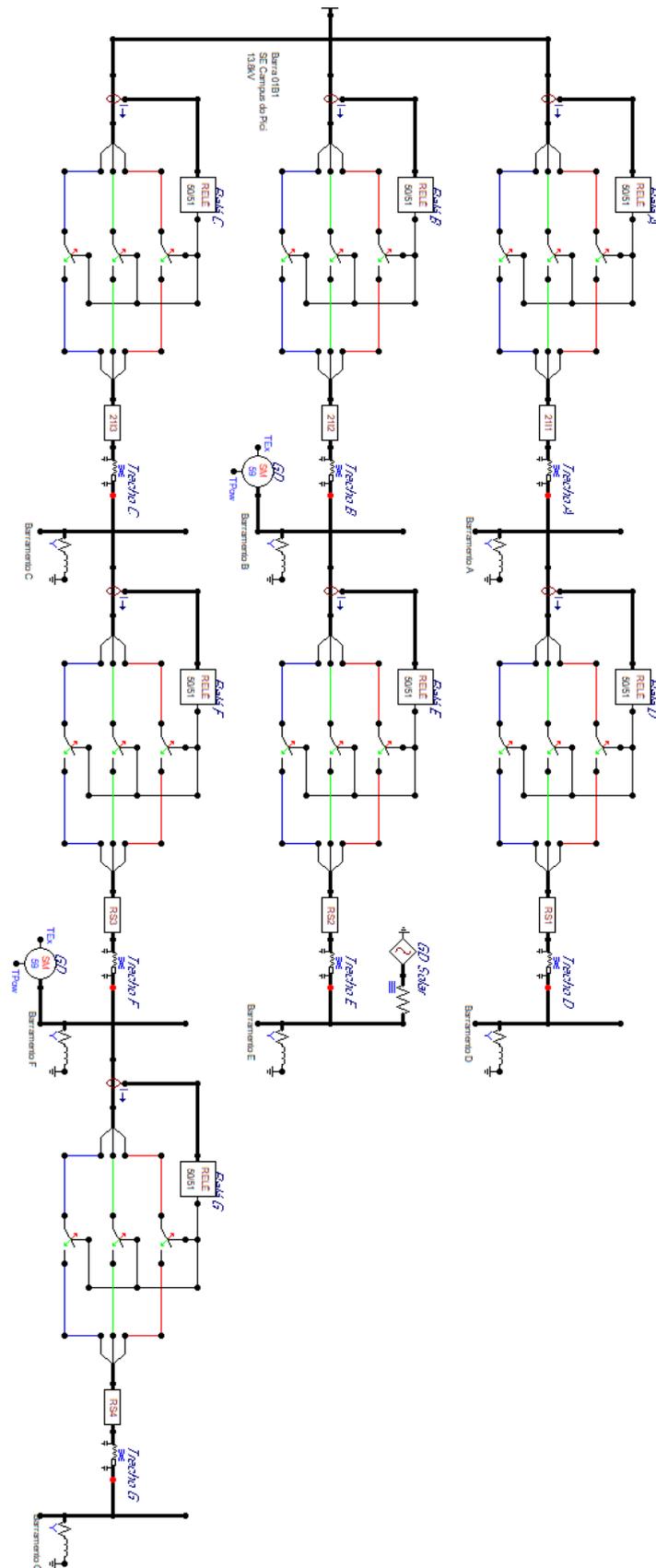
Todas as simulações foram feitas aplicando-se um curto-circuito no instante de tempo $t = 0,1$ s.

4.4.2. Rede do Pici com a inserção das Gerações Distribuídas

Após a simulação dos tempos de operação dos relés de proteção da rede do Campus do Pici para curtos-circuitos inseridos na rede, inseriu-se gerações distribuídas na rede a fim de poder simular os tempos de operação destes mesmos relés de proteção e comparar os tempos de operação dos mesmos diante desta situação, e assim, poder concluir se a inserção de gerações distribuídas na rede do Pici é benéfica ou não, do ponto de vista de proteção dos sistema elétrico de potência.

É mostrado na Figura 57 a rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici com a inserção de uma GD representada por um gerador síncrono no barramento B e outra no barramento F, e ainda, uma geração solar no barramento E, o local de inserção das GDs foi definido aleatoriamente pois o foco do trabalho é analisar seus impactos e não analisar seu melhor posicionamento.

Figura 57 - Rede de Média Tensão do Campus do Pici modelada no ATPDraw com a inserção das Gerações Distribuídas



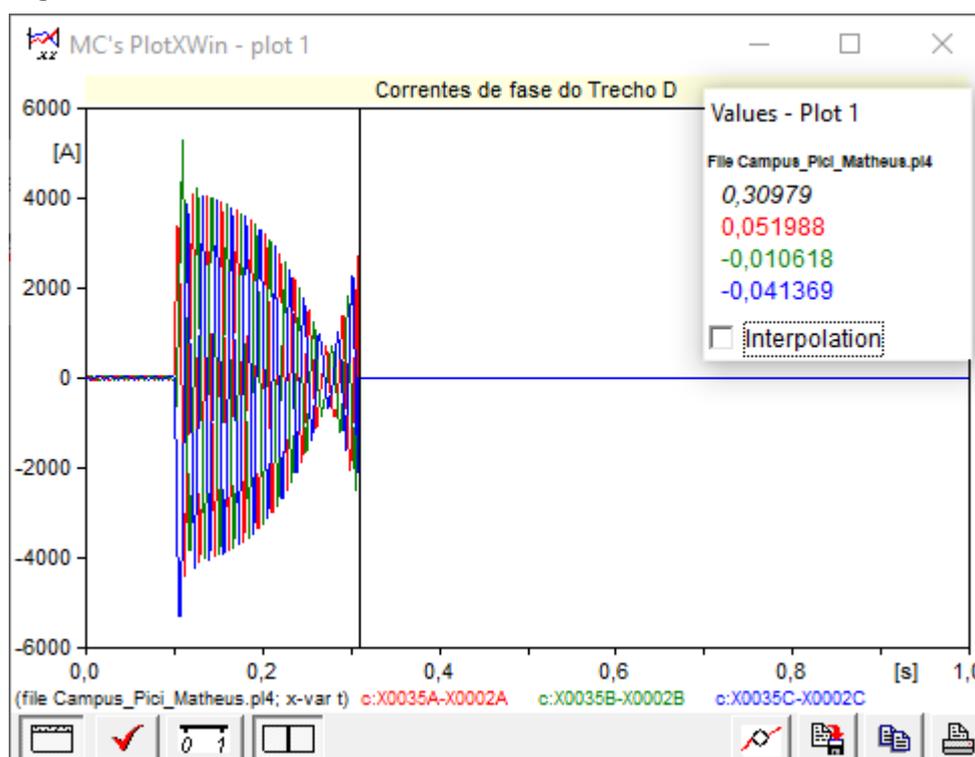
Fonte: O próprio autor (2019)

4.4.3. Simulação da falha no barramento D

4.4.3.1. Curto-circuito trifásico no barramento D com todos os relés de proteção habilitados

É mostrado na Figura 58 as correntes de fase do Trecho D, ao se aplicar um curto-circuito trifásico no barramento D no instante de tempo $t = 0,1$ s.

Figura 58 - Correntes de fase do Trecho D



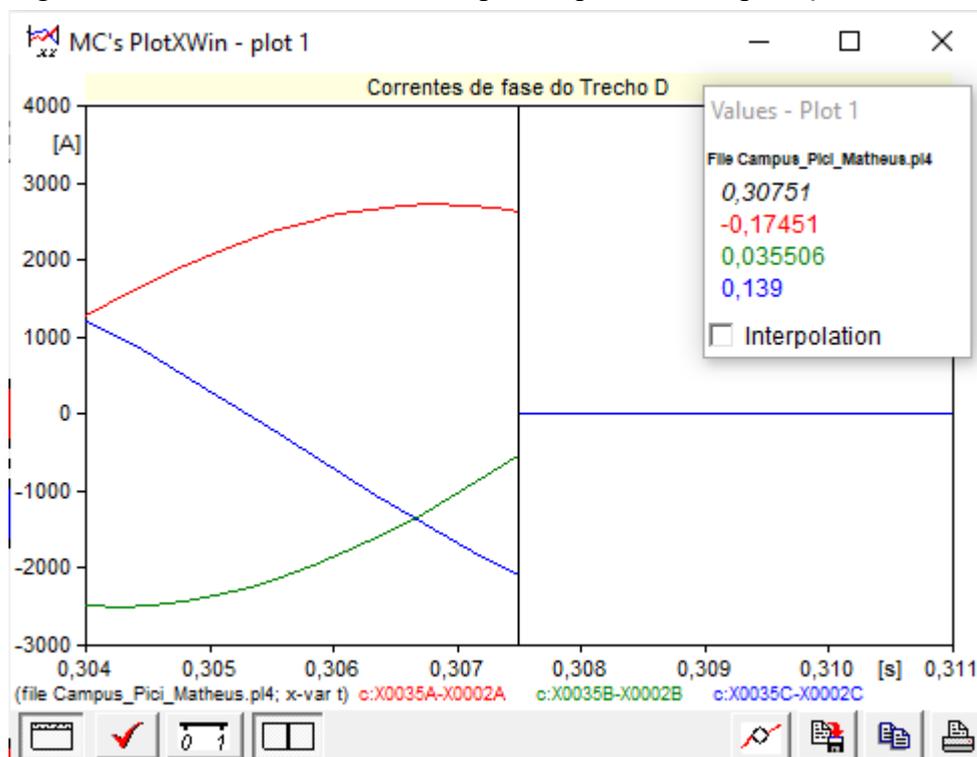
Fonte: O próprio autor (2019)

A princípio já pode-se notar uma diferença no comportamento da forma de onda da corrente no neste trecho, pode-se ver, ainda, que o nível de curto-circuito aumentou com relação ao nível de curto-circuito deste trecho quando não se tinha a GD inserida, o que pode levar ao funcionamento incorreto das proteções, além disso, este alto nível de curto-circuito pode vir até a danificar alguns equipamentos do sistema elétrico que não esteja dimensionado para esta situação.

Como o ATPDraw está mostrando 1 segundo de simulação, este valor de tempo de operação do relé não é muito preciso, pois não se pode garantir que o valor obtido no gráfico se refere realmente ao instante de tempo em que se se corta a corrente de curto-circuito. Diante

disso, com a ferramenta zoom do ATPDraw, ampliou-se o gráfico nas proximidades do instante de tempo em que o relé de proteção atua, conforme Figura 59.

Figura 59 - Zoom no instante de tempo em que o relé de proteção atua



Fonte: O próprio autor (2019)

O relé de proteção do Trecho D atuou e eliminou a falha no instante de tempo $t = 0,30751$ s, como o curto-circuito trifásico acontece no instante de tempo $t = 0,1$ s, o tempo de atuação do relé de proteção é:

$$T_{opD} = 0,30751 - 0,1 = 0,20751 \text{ s}$$

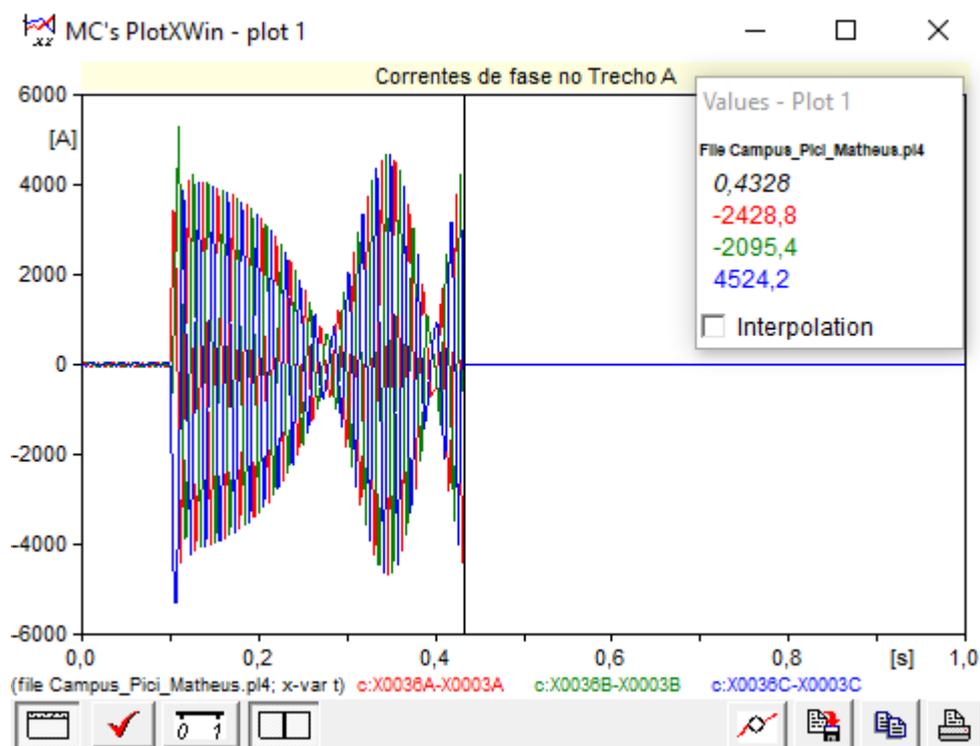
Outra diferença que pode ser observada é no tempo de atuação do relé de proteção, em que este estava dimensionado para atuar num tempo de operação igual a 150 ms, porém, este atuou com um tempo de operação igual a aproximadamente 207,51 ms, o que para este tipo operação, pode ser uma diferença significativa.

4.4.3.2. Curto-circuito trifásico no barramento D com falha do relé de proteção do trecho D

Assim como feito no item 4.3., para se simular a falha do relé de proteção do Trecho D, desabilitou-se o mesmo no ATPDraw para que se pudesse ver o tempo de atuação do relé de proteção do Trecho A, quando se tem esta referida falha no componente.

É observado na Figura 60 as correntes de fase do Trecho A, ao se aplicar um curto-circuito trifásico no barramento D no instante de tempo $t = 0,1$ s.

Figura 60 - Correntes de fase no Trecho A

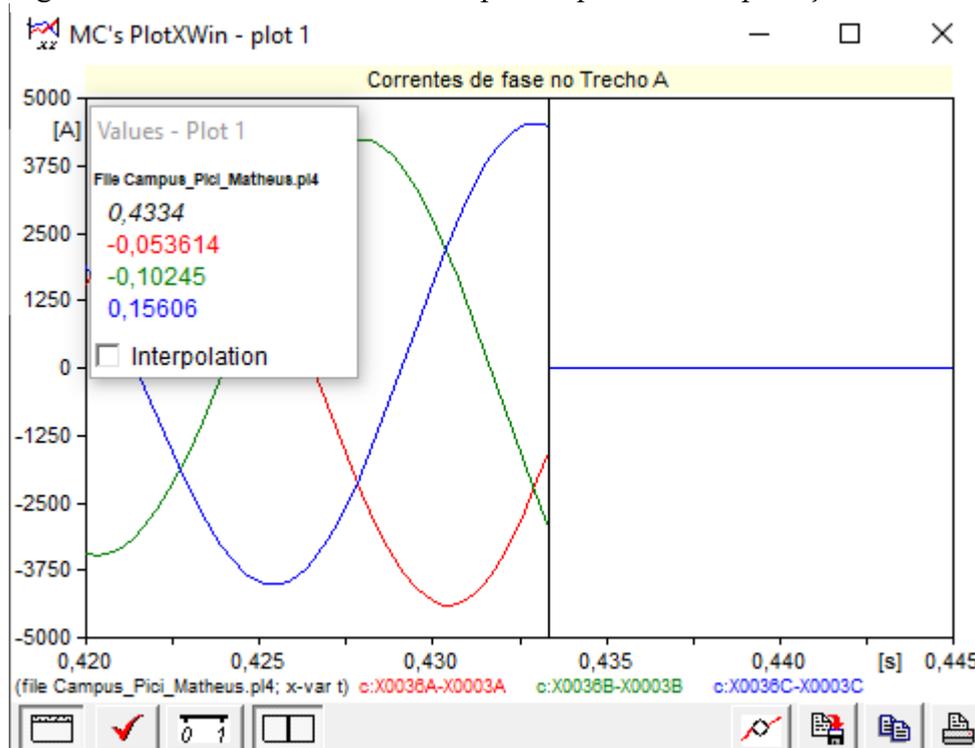


Fonte: O próprio autor (2019)

Assim como na simulação anterior, pode-se notar uma diferença no comportamento da forma de onda da corrente no neste trecho, desta vez por um período de tempo maior, e ainda, ratificar que o nível de curto-circuito aumentou com relação ao nível de curto-circuito deste trecho quando não se tinha a GD inserida.

Como o ATPDraw está mostrando 1 segundo de simulação, este valor de tempo de operação do relé não é muito preciso, pois não se pode garantir que o valor obtido no gráfico se refere realmente ao instante de tempo em que se se corta a corrente de curto-circuito. Diante disso, com a ferramenta zoom do ATPDraw, ampliou-se o gráfico nas proximidades do instante de tempo em que o relé de proteção atua, conforme Figura 61.

Figura 61 - Zoom no instante de tempo em que o relé de proteção atua



Fonte: O próprio autor (2019)

O relé de proteção do Trecho A atuou e eliminou a falha no instante de tempo $t = 0,4334$ s, como o curto-circuito trifásico acontece no instante de tempo $t = 0,1$ s, o tempo de atuação do relé de proteção é:

$$T_{opA} = 0,4334 - 0,1 = 0,3334 \text{ s}$$

Outra diferença que pode ser observada é no tempo de atuação do relé de proteção, em que este estava dimensionado para atuar num tempo de operação igual a 450 ms, porém, este atuou com um tempo de operação igual a aproximadamente 333,4 ms, o que para este tipo operação, pode ser uma diferença significativa.

4.4.3.3. Coordenação entre os relés de proteção

Para se verificar se os relés de proteção estão coordenados, fez-se o cálculo da margem de tempo de atuação entres estes dois relés, visto que para haver coordenação entre os mesmos, a diferença entres seus tempos de operação deve ser igual ou superior a 300 ms.

$$T_{opA} - T_{opD} = 0,3334 - 0,20751 = 0,12589 \text{ s}$$

Ou seja, isso mostra que os relés de proteção contra sobrecorrente temporizados do Trecho A e do Trecho D não estão coordenados, pois a diferença entre os tempos de atuação

dos mesmos é menor que 300 ms. Isso ocorreu devido a inserção das gerações distribuídas no sistema, pois elas contribuem para a corrente de falta, caso haja esta ocorrência, e isso implica diretamente no tempo de atuação da proteção.

4.4.4. Simulação da falha em todos os barramentos

As simulações das faltas nos outros barramentos dos outros alimentadores foram feitas da mesma forma que descrito no item 4.4.3., ou seja, aplicou-se um curto-circuito trifásico no último do alimentador, e simulou-se os tempos de atuação de cada relé de proteção do referido alimentador, e posteriormente, calculou-se as margens de tempo de operação destas proteções, para se verificar se as mesmas estão coordenadas ou não.

O resumo das simulações e resultados dos tempos de atuação dos relés de proteção de todos os alimentadores é apresentado Tabela 8 seguinte, em que se nota os relés de proteção da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici não estão mais todos coordenados.

Tabela 8 - Tempo de Operação e Margens de tempo dos relés de proteção

TRECHO A		TRECHO D		
Tempo de Operação	Margem de Tempo	Tempo de Operação		
0,4334	0,22589	0,20751		
TRECHO B		TRECHO E		
Tempo de Operação	Margem de Tempo	Tempo de Operação		
0,3242	0,09165	0,23255		
TRECHO C		TRECHO F		TRECHO G
Tempo de Operação	Margem de Tempo	Tempo de Operação	Margem de Tempo	Tempo de Operação
0,82645	0,3586	0,46785	0,22029	0,24756

Fonte: O próprio autor (2019)

Ao se analisar a Tabela 8 pode-se aferir que apenas os relés de proteção dos trechos C e F estão coordenados, pois a margem de tempo de operação entre os mesmos é maior que 300 ms, já nos outros, não há coordenação entre as proteções, pois a margem de tempo de operação é menor que 300 ms, chegando a ser, em um dos casos, igual a 91,65 ms, que é um valor de margem de tempo muito pequena.

4.5. Conclusões do capítulo

Este capítulo apresentou os resultados obtidos através da simulação da rede de média tensão de distribuição do Campus do Pici modelada no capítulo 3 deste trabalho, a priori, sem a inserção de geração distribuída na rede, e posteriormente com a inserção de gerações distribuídas na rede, podendo-se assim, comparar o funcionamento dos relés de proteção diante das duas situações e analisar os impactos da inserção da GD no sistema elétrico do Campus do Pici.

Inicialmente, apresentou-se o cálculo das parametrizações de todos os relés de proteção, podendo-se ver posteriormente, todos os ajustes destes relés apresentados na Tabela 6. Posteriormente simulou-se todo o sistema com todos os relés de proteção parametrizados sem as GDs e pôde-se aferir das simulações e seus resultados que todo o sistema estava parametrizado e coordenado. Por fim, mostrou-se a simulação do sistema com a inserção das GDs no mesmo, pôde-se aferir das simulações e seus resultados que os relés de proteção não estavam mais coordenados devido a inserção das GDs no sistema, além disso, no alimentador em que se inseriu uma GD proveniente de uma máquina síncrona e uma geração solar teve-se a falta de coordenação mais gritante de todo o sistema, onde a margem de tempo entre as proteções chegou a 91,65 ms, que é um valor muito baixo para este tipo de aplicação.

5. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTO FUTURO

5.1. Conclusão

Este trabalho apresentou a modelagem do sistema elétrico de distribuição do Campus do Pici utilizando o software ATPDraw e, a partir das simulações do mesmo, analisou-se os impactos provocados pela inserção da geração distribuída neste sistema. Para tanto, apresentou-se a modelagem dos relés de proteção de sobrecorrente temporizada com ajuste instantâneo, disjuntor trifásico, fonte de tensão, linha de distribuição, transformador de potencial, cargas, amperímetros, geração distribuída proveniente de uma máquina síncrona, geração solar fotovoltaica e do curto-circuito trifásico, e modelou-se, por fim, toda a rede de distribuição do Campus do Pici. Diante do sistema modelado, fez-se as simulações primeiramente sem a inserção da GD e posteriormente com a inserção da GD, em seguida analisou-se as diferenças entre as duas situações e verificou-se os impactos negativos sobre o sistema de proteção provocados pela inserção das GDs.

As situações simuladas permitiram constatar que a inserção de geração distribuída na rede do Campus do Pici provoca uma mudança de comportamento na forma de onda das correntes de curto-circuito de cada trecho desta rede, provoca, ainda, um aumento no nível de curto-circuito em todos os barramentos, o que acarreta na descoordenação entre os relés de proteção de sobrecorrente temporizados.

Pode-se verificar que, dentre os sete relés de proteção de sobrecorrente temporizados modelados e inseridos na rede, houve coordenação apenas entre os relés de proteção dos trechos C e F, dentre os demais as margens de tempo de operação dos relés de proteção eram menores que 300 ms, chegando a ser, no seu valor mínimo, igual a 91,65 ms, o que é um valor muito pequeno para este tipo de operação.

Pode-se concluir, então, diante das informações e conclusões obtidas a partir deste trabalho, que a inserção de gerações distribuídas na rede do Campus do Pici, assim como em quaisquer outros sistemas elétricos de potência, não pode ser feita sem antes haver um estudo dos impactos provocados por elas, para evitar problemas sérios como a descoordenação das proteções deste sistema.

5.2. Trabalhos futuros

Como proposta para desenvolvimento futuro, tem-se:

1. Usar a rede do Campus do Pici com todas proteções modeladas e parametrizadas para o estudo dos impactos da geração distribuída na disciplina de proteção de sistemas elétricos de potência.
2. Estudar quais os locais onde as GDs podem ser inseridas na rede do Campus do Pici e não se haver a descoordenação de todas as proteções.
3. Melhor modelagem das gerações fotovoltaicas, de maneira que se represente melhor todos os seus componentes para que se possa analisar de maneira mais precisa seus efeitos.
4. Fazer o estudo dos impactos da geração distribuída na rede do Campus do Pici modelando-se curtos-circuitos bifásicos, bifásicos à terra e monofásicos, explorando-se, assim, as funções de proteção de Neutro dos relés.

REFERÊNCIAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; 2015. **Resolução Normativa N° 673**, de 4 de agosto de 2015, Brasil, 2015.
- BARBOSA, T. M. **Desenvolvimento de um Sistema de Recomposição Automática Baseado em Sistemas Multiagentes para Redes de Distribuição de Energia em Média Tensão**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2017.
- CES, Natália Pimentel Lado. **Modelagem e análise em ATP do comportamento da microrrede do condomínio residencial Alphaville-Fortaleza**. 2018. 100 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- COLMENAR-SANTOS, A. et al. Distributed generation: A review of factors that can contribute most to achieve a scenario of DG units embedded in the new distribution networks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1130–1148, 2016.
- ELETRORBRÁS. **Proteção de sistemas aéreos de distribuição**. Rio de Janeiro, Campus, 1982.
- FONSECA, H. L. C. A.; LEAL, M. F. **Análise de transitórios eletromagnéticos utilizando o ATPDraw**. 2003. 57 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.
- GODOY, Methodio Varejão. **Estágio atual e novas tecnologias de limitação de corrente de curto circuito a serem adotadas pelo planejamento da expansão Chesf**. Pernambuco, 2009.
- GOMEZ, J. C. et al. Distributed generation: Impact on protections and power quality. **IEEE Latin America Transactions**, v. 11, n. 1, p. 460–465, 2013.
- HØIDALEN, H. K. **ATPDraw: The graphical preprocessor do ATP Electromagnetic Transients Program**. Noruega: NTNU, 2012. Disponível em: <<https://www.atpdraw.net/index.php>>. Acesso em: 16 set. 2019.
- KELLER, J.; KROPOSKI, B. **Understanding Fault Characteristics of InverterBased Distributed Energy Resources**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/971441-jJGkWx/>>.
- KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**, Third Edition. [s.l.:s.n.].
- KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 5. ed. Florianópolis: LabPlan, 2010.
- LOURENÇO, João Murilo Albuquerque. **Modelagem e simulação de relés de proteção de alimentadores de distribuição utilizando o ATPDraw como estudo de caso de um alimentador da rede Aquiraz**. 2018. 117 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- MAEZONO, P. K. **Proteção de Sistemas de Distribuição**, São Paulo, 2015.

MARDEGAN, C. S. Guia prático de curto-circuito e seletividade em sistemas industriais, 2012.

MASAUD, T. M.; MISTRY, R. D. Fault current contribution of Renewable Distributed Generation: An overview and key issues. **2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2016**, p. 229–234, 2017.

MATIAS, Carreira e Leote, Nobre. **Produção, transporte e distribuição de energia elétrica**. Lisboa: [s.n], 1990.

MIGUEL, Pablo Mourente. **Introdução à simulação de relés de proteção usando a linguagem “models” do ATP**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.

MONTEIRO, Andréia Maia. **Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller)**. 2005. 129 f. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

NPAG. **Protective Relays, Measurement and Control**, 2011.

PESSOA, Letícia Lúcia da Silva. **Impactos provocados pelos afundamentos de tensão em redes elétricas com geração distribuída**. 2016. 143 f. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

PROJETO FINAL: Critérios para Cálculo dos Ajustes da Proteção da Subestação. Fortaleza, 2018.

Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. **Altera a Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012, e os módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST**. Brasília, DISTRITO FEDERAL, Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2019.

Resolução Normativa nº 786, de 17 de outubro de 2017. **Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Brasília, DISTRITO FEDERAL, Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2019.

RODRIGUES, M. S. DE L. **Teste e Validação das Funções de Proteção baseadas na Norma IEC 61850 Propostas Para Implantação no Projeto Piloto da Rede de Distribuição Inteligente de Aquiraz**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2015.

RUSH, Peter. **Proteção e Automação de Redes: Conceito e Aplicação**. São Paulo: Editora Blcscher, 2011.

SAMPAIO, Felipe Carvalho. **Sistema multiagente de proteção adaptativa**. 2017. 75 f. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SAMPAIO, R. F. **Sistema de automação distribuído: uma abordagem baseada em multiagente aplicada a sistemas de distribuição de energia elétrica em média tensão.** 2017.

SCHNEIDER. Parametrizando a função de sobrecorrente de fase nos relés SEPAM, 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará.** Fortaleza, 2013.

XAVIER, Bárbara Vieira; ROMANO, Renata. **Implementação de um relé de sobrecorrente temporizado utilizando a linguagem “models” do Alternative Transients Program.** 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013

ZILLER, Roberto; MACÊDO, Wilson Negrão; GALHARDO, Marcos André Barros; DE OLIVEIRA, Sérgio Henrique Ferreira. **SISTEMAS SOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 208 p.

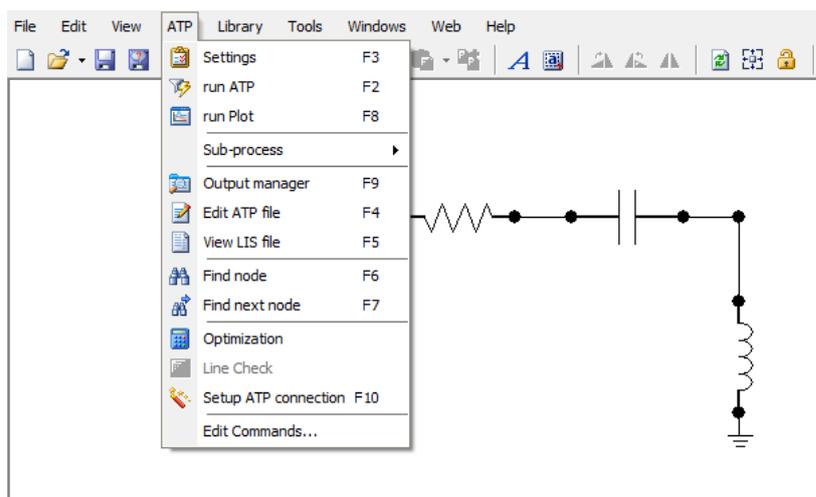
APÊNDICE A – EXEMPLO DE SIMULAÇÃO NO ATPDRAW

Este apêndice mostra o passo a passo para se fazer uma simulação no ATPDraw, além dos resultados obtidos pela mesma, fazendo-se uso do circuito RLC modelado no capítulo 3

Com a montagem do circuito feita e os parâmetros do circuito definidos, o próximo passo para se simular o circuito RLC é estabelecer as configurações da simulação, umas das partes mais importantes do processo, pois é nesta parte que se decide o tempo de simulação, além de escolher em qual domínio se quer trabalhar, como domínio do tempo ou domínio da frequência e ainda se existem ou não harmônicas no sistema. (FONSECA; LEAL, 2003). Nem toda simulação requer o mesmo tempo de simulação, pois isso depende do tipo de circuito que se quer analisar. Há circuitos em que se quer analisar apenas o período transitório, em outros casos se quer analisar o comportamento do circuito em regime permanente, por isso a escolha do tempo de simulação se faz tão importante.

Para definir as configurações da simulação, tem-se que clicar no ícone “ATP” na barra de tarefas do ATPDraw e posteriormente clicar em “Settings”, como mostrado na Figura A1.

Figura A1 – Opções do ícone “ATP” na barra de tarefas do ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

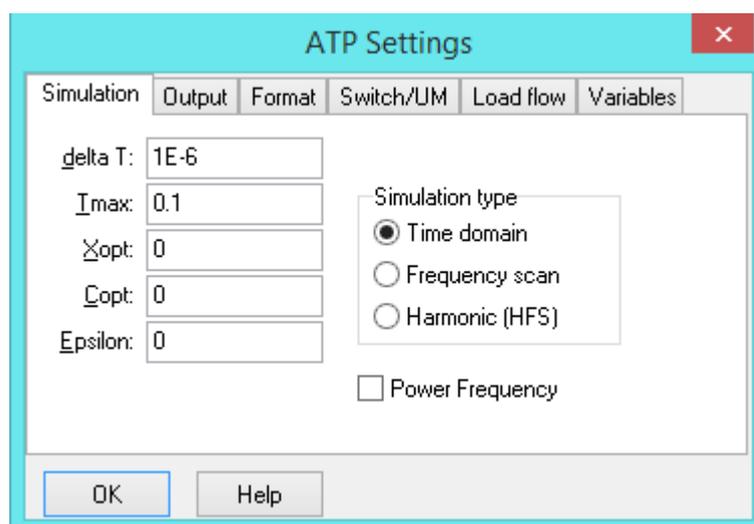
Ao se selecionar a opção “Settings”, o ATPDraw mostra a caixa de diálogo observada na Figura A2, com todos os parâmetros editáveis da simulação, em que “ ΔT ” significa o intervalo de análise, ou seja, o período em que o programa irá efetuar uma nova leitura do circuito, “ T_{max} ” é o tempo máximo de simulação do circuito, “ X_{opt} ” é responsável

por determinar qual a unidade adotada pelo circuito para a indutância, quando “*Xopt*” é inicializada com o valor zero, significa que o valor da indutância será dado em mH, se este não for o caso, o sistema do programa considerará este valor em ohms, “*Copt*” é responsável por determinar qual a unidade adotada pelo circuito para a capacitância, quando “*Copt*” é inicializada com o valor zero, significa que o valor da capacitância será dado em μF , se este não for o caso, o sistema do programa considerará este valor em ohms, seguindo a mesma lógica de “*Xopt*”, “*Simulation type*” representa, na simulação, qual o domínio que será utilizado (FONSECA; LEAL, 2003).

Os parâmetros da simulação foram definidos da seguinte forma:

- Delta T: 1 μF ;
- Tmax: 100 ms;
- Xopt: 0;
- Copt: 0;
- Simulation type: manteve-se selecionado a opção “*time domain*”, que significa domínio do tempo.

Figura A2 – Configurações editáveis da simulação no ATPDraw



Fonte: O próprio autor (2019)

Para salvar um arquivo no ATPDraw basta clicar no botão “*salvar*” na barra de tarefa (FONSECA; LEAL, 2003).

Posteriormente a isso, deve-se gerar um formato em linhas de comando que descrevem o circuito elétrico construído, isso se faz selecionando-se o ícone “*ATP*” na barra de

tarefa, como mostrado na Figura A1, e selecionando, posteriormente, a opção “*Sub-process*”, e após isso, a opção “*Make ATP file*” e dar um nome ao circuito.

As linhas de comando criadas podem ser visualizadas clicando-se novamente na opção “*ATP*” e após isso, clicando-se em “*Edit ATP file*”, conforme mostrado na Figura A3.

Figura A3 – Linhas de comando que descrevem o circuito elétrico implementado

```

Text Editor: Noname.atp
File Edit Character Help
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW outubro, terça-feira 22, 2019
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2016
C -----
C dT <> Tmax <> Xopt <> Copt <> Epsilon
  1.E-6   .001
    500   1     1     1     1     0     0     1     0
C   1     2     3     4     5     6     7     8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 <> n2 <> ref1 <> ref2 <> R <> L <> C <>
C < n1 <> n2 <> ref1 <> ref2 <> R <> A <> B <> Leng <> <>
  XX0001XX0002           1.E4           0
  XX0002XX0003           1.             0
  XX0003                1.             0
/SOURCE
C < n 1 <> <> Ampl. <> Freq. <> Phase/T0 <> A1 <> T1 <> ISTART <> TSTOP <>
14XX0001   1.E4   60.   -1.   100.
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
1:1

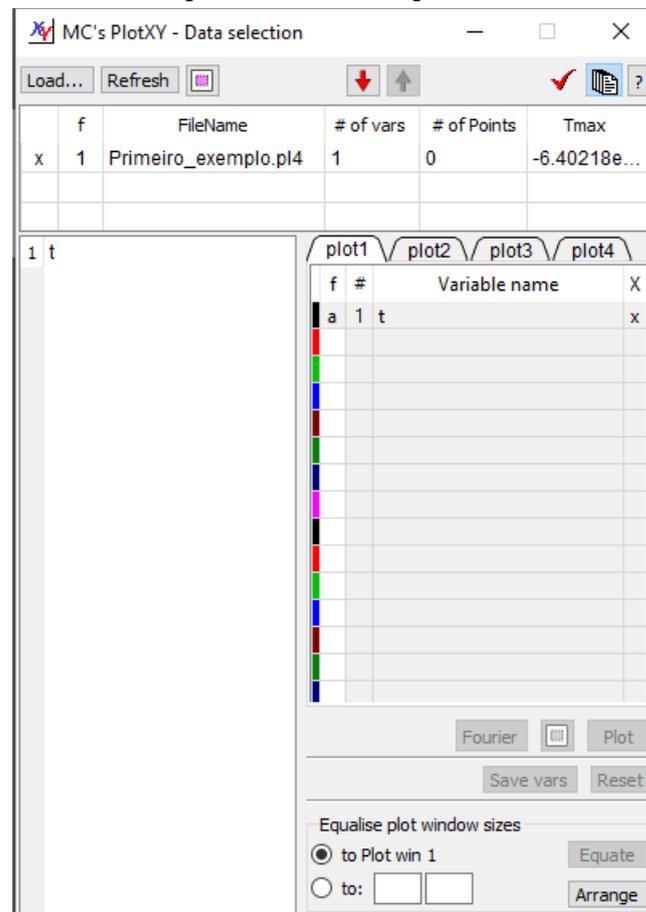
```

Fonte: O próprio autor (2019)

Para se executar a simulação do circuito RLC modelado no ATPDraw, tem-se que clicar no ícone “*ATP*” e em seguida em “*run ATP*” e aguardar a compilação do programa.

Para se poder visualizar os dados da simulação, tem-se que clicar no ícone “*ATP*” e em seguida em “*run plot*”, feito isso, se mostrará outra caixa de diálogo, como mostrado na Figura A4.

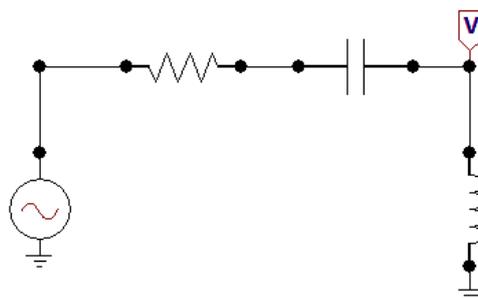
Figura A4 – Janela inicial para a resposta gráfica do ATPDraw para o circuito implementado



Fonte: O próprio autor (2019)

Adicionou-se no circuito a presença de uma ponteira de tensão, para que se pudesse medir esta grandeza no circuito em questão, e assim ter alguma variável que o ATPDraw possa medir e mostrar graficamente, como observado na Figura A5.

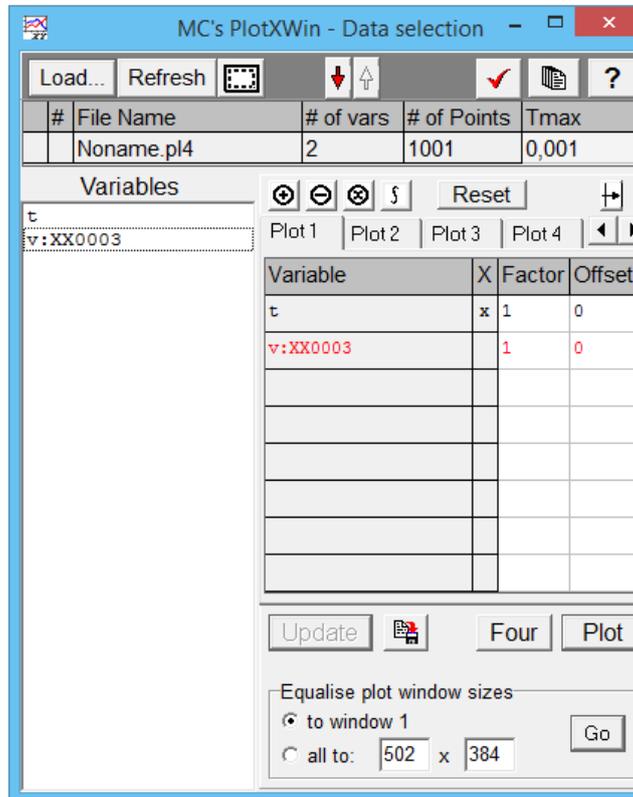
Figura A5 – Circuito RLC no ATPDraw com a ponteira de tensão



Fonte: O próprio autor (2019)

Ao se clicar novamente em “run plot”, tem-se a janela mostrada na Figura A6, onde vê-se uma variável a mais em “variable name”, isso devido a presença da ponteira de tensão no circuito.

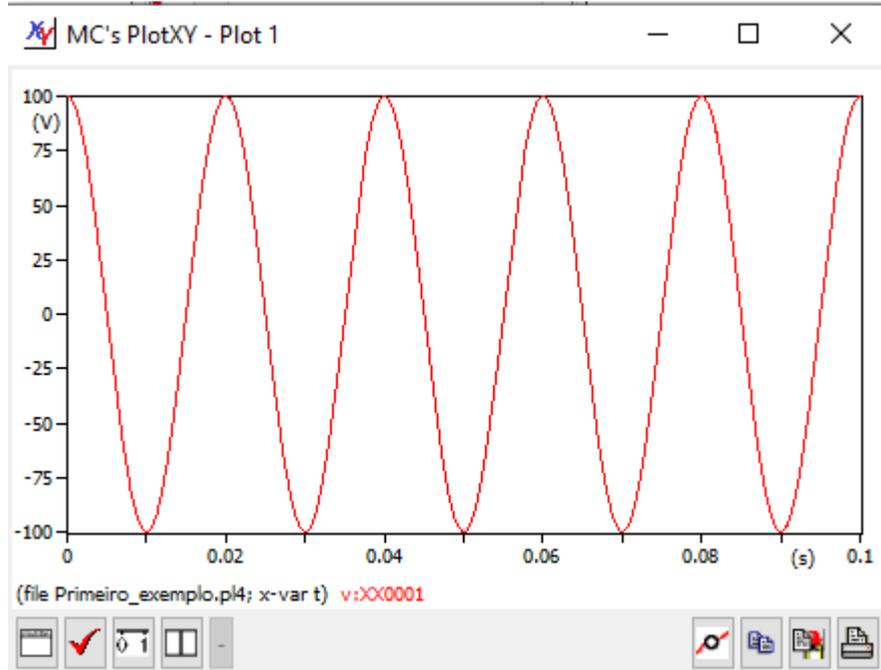
Figura A6 – Janela inicial para a resposta gráfica do ATPDraw para o circuito implementado com a ponteira de tensão



Fonte: O próprio autor (2019)

Ao se clicar no botão “plot”, tem-se a seguinte resposta gráfica mostrada na Figura A7, onde vê-se a tensão aplicada no indutor, que é uma resposta esperada devido a característica alternada da fonte de tensão.

Figura A7 – Tensão sobre o indutor do circuito RLC implementado



Fonte: O próprio autor (2019)

APÊNDICE B – PARÂMETROS E AJUSTES DOS RELÉS DE PROTEÇÃO MODELADOS NO ATPDRAW

Figura B1 - Parâmetros inseridos no relé de proteção do Trecho A

MODEL: RTI

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Is51	A	2.2273
tret51	s	0
Tipo51		2
k51		1.033978
RTC		30
Is50		606.16

NODE	PHASE	NAME
I	ABC	X0033
TRIP	1	XX0032

Copy Paste Reset Order: 0 Label: Relé A

Comment:

Models Library

Model: RTI Edit Use As: DEFAULT Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

Figura B2 - Parâmetros inseridos no relé de proteção do Trecho B

MODEL: RTI

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Is51	A	2.4097
tret51	s	0
Tipo51		2
k51		0.924324
RTC		30
Is50		606.16

NODE	PHASE	NAME
I	ABC	X0036
TRIP	1	XX0035

Copy Paste Reset Order: 0 Label: Relé B

Comment:

Models Library

Model: RTI Edit Use As: DEFAULT Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

Figura B3 – Parâmetros inseridos no relé de proteção do Trecho C

MODEL: RTI

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Is51	A	4.8139
tret51	s	0
Tipo51		2
k51		0.788615
RTC		30
Is50		606.16

NODE	PHASE	NAME
I	ABC	×0031
TRIP	1	××0030

Copy Paste Reset Order: 0 Label: Relé C

Comment:

Models Library

Model: RTI Edit Use As: DEFAULT Record Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

Figura B4 – Parâmetros inseridos no relé de proteção do Trecho D

MODEL: RTI

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Is51	A	1.2972
tret51	s	0
Tipo51		2
k51		0.599292
RTC		30
Is50		606.16

NODE	PHASE	NAME
I	ABC	×0031
TRIP	1	××0030

Copy Paste Reset Order: 0 Label: Relé D

Comment:

Models Library

Model: RTI Edit Use As: DEFAULT Record Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

Figura B5 - Parâmetros inseridos no relé de proteção do trecho E

MODEL: RTI

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Is51	A	1
tret51	s	0
Tipo51		2
k51		0.757111
RTC		30
Is50		606.16

NODE	PHASE	NAME
I	ABC	×0038
TRIP	1	××0037

Copy Paste Reset Order: 0 Label: Relé E

Comment:

Models Library

Model: RTI Edit Use As: DEFAULT Record Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

Figura B6 - Parâmetros inseridos no relé de proteção do trecho F

MODEL: RTI

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Is51	A	4.3506
tret51	s	0
Tipo51		2
k51		0.548947
RTC		30
Is50		606.16

NODE	PHASE	NAME
I	ABC	×0031
TRIP	1	××0030

Copy Paste Reset Order: 0 Label: Relé F

Comment:

Models Library

Model: RTI Edit Use As: DEFAULT Record Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

Figura B7 - Parâmetros inseridos no relé de proteção do trecho G

MODEL: RTI

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Is51	A	1.76
tret51	s	0
Tipo51		2
k51		0.5633
RTC		30
Is50		606.16

NODE	PHASE	NAME
I	ABC	×0034
TRIP	1	××0033

Copy Paste Reset Order: 0 Label: Relé G

Comment:

Models Library

Model: RTI Edit Use As: DEFAULT Record

Hide
 Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: O próprio autor (2019)

ANEXO A – CÓDIGO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE TEMPORIZADO COM AJUSTE DE INSTANTÂNEO (FUNÇÃO 50/51)

MODEL RTI

DATA

```
Is51 -- Corrente de ajuste do 51
tret51 -- tempo de retardo do 51.
Tipo51 -- escolha da curva 51
k51 -- multiplicador de tempo 51
RTC -- Relação do Transformador de Corrente
Is50 -- Corrente de ajuste do 50
```

INPUT

```
I[1..3] -- corrente nos terminais [A]
```

OUTPUT

TRIP

CONST

```
freq {VAL:60}
```

VAR

```
IA
IB
IC
```

```
il1
il2
il3
```

```
IefA -- corrente eficaz da fase A
IefB --corrente eficaz da fase B
IefC --corrente eficaz da fase C
```

```
IsefA
IsefB
IsefC
```

```
t1A --tempo em que a corrente eficaz atingiu a corrente de ajuste pela
primeira vez
```

```
t1B
t1C
```

```
t2A --soma do tempo t1 com o tempo de retardo RET
```

```
t2B
t2C
```

```
t3A -- variável que garante que o tempo t1 que será registrado é o primeiro
tempo que a corrente ultrapassa o ajuste
```

```
t3B
t3C
```

```
t4
```

TRIP

RET51A
RET51B
RET51C

period

TIMESTEP MIN:1E-5

DELAY CELLS (il1) :1/freq/timestep+1
CELLS (il2) :1/freq/timestep+1
CELLS (il3) :1/freq/timestep+1

INIT

RET51A:=0
RET51B:=0
RET51C:=0

t1A:=5
t1B:=5
t1C:=5

t2A:=5
t2B:=5
t2C:=5

t3A:=0
t3B:=0
t3C:=0

t4:=0

histdef (il1) :=0
histdef (il2) :=0
histdef (il3) :=0

histdef (integral (IA)) :=0
histdef (integral (IB)) :=0
histdef (integral (IC)) :=0

period:=recip(freq)

TRIP:=1

ENDINIT

Function Crv1 (x, y, z) :=z*0.14/ (exp (0.02*ln (x/y))-1) -- *IEC A inversa*
Function Crv2 (x, y, z) :=z*13.5/ (x/y-1) -- *IEC B muito inversa*
Function Crv3 (x, y, z) :=z*80/ (exp (2*ln (x/y))-1) -- *IEC C Extrem Inversa*
Function Crv4 (x, y, z) :=z*120/ (x/y-1) -- *IEC D Longtime*
Function Crv5 (x, y, z) :=z* (8.9341/ (exp (2.0938*ln (x/y))-1)+0.17966) -- *IEEE Inversa*
Function Crv6 (x, y, z) :=z* (0.0103/ (exp (0.02*ln (x/y))-1)+0.0228) -- *IEEE Moderadamente Inversa*
Function Crv7 (x, y, z) :=z* (3.992/ (exp (2*ln (x/y))-1)+0.0962) -- *IEEE Muito Inversa*

EXEC

IA:=I [1] *I [1]
IB:=I [2] *I [2]

```

IC:=I[3]*I[3]

il1:=integral (IA)
il2:=integral (IB)
il3:=integral (IC)

IefA:=sqrt ((il1-delay (il1,period))/period)
IefB:=sqrt ((il2-delay (il2,period))/period)
IefC:=sqrt ((il3-delay (il3,period))/period)

IsefA:= IefA/RTC
IsefB:= IefB/RTC
IsefC:= IefC/RTC

if (IsefA<Is51) and (IsefB<Is51) and (IsefC<Is51) and (IsefA<Is50) and
(IsefB<Is50) and (IsefC<Is50) and (t4=0) then
  TRIP:=1
else

  -- CALCULO FASE A

    if (IsefA >= Is51 and IsefA<Is50) then

      if (t3A=0) then -- código para que o tempo registrado seja o
primeiro que a corrente excedeu o ajuste, caso já tenha atingido uma vez o
ajuste,

      -- o programa não entra nessa parte e nem
calcula RET e nem nada

      t1A:=t -- registra em que tempo a corrente eficaz passou a de
ajuste

      t3A:=1
      endif

if Tipo51=0 then
  RET51A:=tret51
endif

if Tipo51=1 then -- curva IEC tipo A
  RET51A:=Crv1 (IsefA, Is51, k51)
endif

if Tipo51=2 then -- curva IEC tipo B
  RET51A:=Crv2 (IsefA, Is51, k51)
endif

if Tipo51=3 then -- curva IEC tipo C
  RET51A:=Crv3 (IsefA, Is51, k51)
endif

if Tipo51=4 then -- curva IEC tipo D
  RET51A:=Crv4 (IsefA, Is51, k51)
endif

if Tipo51=5 then -- curva IEEE Inversa
  RET51A:=Crv5 (IsefA, Is51, k51)
endif

if Tipo51=6 then -- curva IEEE Moderadamente Inversa

```

```

    RET51A:=Crv6(IsefA,Is51,k51)
endif

if Tipo51=7 then -- curva IEEE Muito Inversa
    RET51A:=Crv7(IsefA,Is51,k51)
endif

    t2A:= t1A + RET51A
endif

-----

-- CALCULO FASE B
if (IsefB >= Is51 and IsefB<Is50) then
    if (t3B=0) then
        t1B:=t
        t3B:=1
    endif

    if Tipo51=0 then
        RET51B:=tret51
    endif

    if Tipo51=1 then -- curva IEC tipo A
        RET51B:=Crv1(IsefB,Is51,k51)
    endif

    if Tipo51=2 then -- curva IEC tipo B
        RET51B:=Crv2(IsefB,Is51,k51)
    endif

    if Tipo51=3 then -- curva IEC tipo C
        RET51B:=Crv3(IsefB,Is51,k51)
    endif

    if Tipo51=4 then -- curva IEC tipo D
        RET51B:=Crv4(IsefB,Is51,k51)
    endif

    if Tipo51=5 then -- curva IEEE Inversa
        RET51B:=Crv5(IsefB,Is51,k51)
    endif

    if Tipo51=6 then -- curva IEEE Moderadamente Inversa
        RET51B:=Crv6(IsefB,Is51,k51)
    endif

    if Tipo51=7 then -- curva IEEE Muito Inversa
        RET51B:=Crv7(IsefB,Is51,k51)
    endif

    t2B:= t1B + RET51B
endif

-----

-- CALCULO FASE C

if (IsefC >= Is51 and IsefB<Is50) then
    if (t3C=0) then
        t1C:=t

```

```

t3C:=1
endif

if Tipo51=0 then
  RET51C:=tret51
endif

if Tipo51=1 then -- curva IEC tipo A
  RET51C:=Crv1(IsefC, Is51, k51)
endif

if Tipo51=2 then -- curva IEC tipo B
  RET51C:=Crv2(IsefC, Is51, k51)
endif

if Tipo51=3 then -- curva IEC tipo C
  RET51C:=Crv3(IsefC, Is51, k51)
endif

if Tipo51=4 then -- curva IEC tipo D
  RET51C:=Crv4(IsefC, Is51, k51)
endif

if Tipo51=5 then -- curva IEEE Inversa
  RET51C:=Crv5(IsefC, Is51, k51)
endif

if Tipo51=6 then -- curva IEEE Moderadamente Inversa
  RET51C:=Crv6(IsefC, Is51, k51)
endif

if Tipo51=7 then -- curva IEEE Muito Inversa
  RET51C:=Crv7(IsefC, Is51, k51)
endif

t2C:= t1C + RET51C

endif

if (t2A<=t) or (t2B<=t) or (t2C<=t) then
  if (t4=0) then
    TRIP:=0
    t4:=1
  endif
endif

endif

if (IsefA>=Is50) or (IsefB>=Is50) or (IsefC>=Is50) then
  if (t4=0) then
    TRIP:=0
    t4:=1
  endif
endif

ENDEXEC
ENDMODEL

```