

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Adriano Cavalheiro Marchesan

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE
PRÉ-PROCESSADOR GRÁFICO PARA ANÁLISE DE
TRANSITÓRIOS EM SUBESTAÇÕES**

**Santa Maria, RS
2016**

Adriano Cavalheiro Marchesan

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE
PRÉ-PROCESSADOR GRÁFICO PARA ANÁLISE DE
TRANSITÓRIOS EM SUBESTAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Ghendy Cardoso Junior
Coorientador: Lenois Mariotto

Santa Maria, RS
2016

Cavalheiro Marchesan, Adriano

Desenvolvimento de um Software Pré-processador
Gráfico para Análise de Transitórios em Subestações /
Adriano Cavalheiro Marchesan. - Santa Maria, RS, 2016.
144 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior

Coorientador: Lenois Mariotto

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2016.

1. Subestações. 2. Transitórios eletromagnéticos. 3.
ATP-EMTP. 4. Pré-processador gráfico. I. Cardoso Junior,
Ghendy II. Mariotto, Lenois III. Título

©2016

Todos os direitos autorais reservados a Adriano Cavalheiro Marchesan. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: adriano.marchesan@ufsm.br

Adriano Cavalheiro Marchesan

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE
PRÉ-PROCESSADOR GRÁFICO PARA ANÁLISE DE
TRANSITÓRIOS EM SUBESTAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 22 de março de 2016:

Ghendy Cardoso Junior (UFSM)
(Presidente / Orientador)

Lenois Mariotto (UFSM)
(Coorientador)

Fernando Augusto Moreira (UFBA)

Lisandra Manzoni Fontoura (UFSM)

Santa Maria, RS
2016

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PRÉ-PROCESSADOR GRÁFICO PARA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS EM SUBESTAÇÕES

AUTOR: ADRIANO CAVALHEIRO MARCHESAN

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR

COORIENTADOR: LENOIS MARIOTTO

Este trabalho apresenta a implementação de um software pré-processador gráfico para a versão alternativa do *ElectroMagnetic Transient Program* (ATP-EMTP), desenvolvido para auxiliar a análise de transitórios eletromagnéticos em subestações de potência. Este software, concebido em linguagem de programação Java, recebeu a denominação de *Alternative Transients Program – Substation Analysis* (ATP-SA). Dentre suas funcionalidades, está a representação de eventos precursores de transitórios eletromagnéticos no padrão ATP-EMTP, predefinição de dados para modelagem destes eventos, parametrização da simulação com valores compatíveis com o fenômeno analisado e gerenciamento de simulações através de um banco de dados. Os eventos contemplados pelo software compreendem: ocorrência e eliminação de curtos-circuitos, energização de transformador, Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) em disjuntores, manobras de abertura e fechamento de disjuntores e descargas atmosféricas. O software fornece suporte a simulação de transitórios provocados por estes eventos de forma determinística ou estocástica. Para demonstrar estas potencialidades, abordam-se exemplos aplicados sobre um sistema elétrico real. Com a utilização do software desenvolvido, espera-se fornecer subsídio e segurança para a realização de operações em subestações, bem como auxiliar a prevenção de falhas, perda de equipamentos e desligamentos. O presente trabalho é parte integrante de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), desenvolvido pelo Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência (LAPES-CEESP) da UFSM, em parceria com a Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT) do Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: Subestações. Transitórios eletromagnéticos. ATP-EMTP. Pré-processador gráfico.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A GRAPHICS PRE-PROCESSOR SOFTWARE FOR TRANSIENT ANALYSIS IN SUBSTATIONS

**AUTHOR: ADRIANO CAVALHEIRO MARCHESAN
ADVISOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR**

The following work presents a graphical pre-processor software as an alternative version of the Electromagnetic Transients Program (ATP-EMTP). It was developed to aid in the analysis of electromagnetic transients in power substations. The software has been developed using Java programming language and it was named Alternative Transients Program – Substation Analysis (ATP-SA). Amongst its functionalities, it can be highlighted the representation of precursory events of electromagnetic transients in the ATP-EMTP standard, data predefinition for the modeling of these events, simulation configuration with compatible values in reference to the transient phenomena to be studied and management simulation through a databank. The transients to be considered are: occurrence and clearance of faults, transformer inrush, Transient Recovery Voltage (TRV) in circuit-breakers, circuit-breaker switching and lightning surges. The software aids in the simulation of transients occurred by these events in both deterministic and stochastic ways. In addition, to show its potentialities, examples of application are presented in a real power system simulations. Hence, with the use of the mentioned software, it is expected to support in subsidies and safety with respect of operations in substations, as well to aid in defect prevention, loss of equipment and potential shutdowns. This work is the main theme of a Research and Development (R&D) project developed by the Laboratory of Analysis and Protection of Power Systems, in the Power System and Energy Research Center, in a partnership along with the State Company of Generation and Transmission of Electric Energy of the Rio Grande do Sul State.

Keywords: Substations. Electromagnetic transients. ATP-EMTP. Graphical preprocessor.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa e motivação	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	13
1.3	Estrutura do trabalho	14
2	TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SUBESTAÇÕES . . .	15
2.1	Aspectos gerais	15
2.2	Curto-Circuitos	16
2.3	Energização de Transformadores	17
2.4	Manobras de Disjuntores	19
2.5	Descargas Atmosféricas	22
2.5.1	Parâmetros típicos da onda de descarga	23
2.5.2	Representação da forma de onda da corrente de descarga	25
3	O ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP-EMTP)	27
3.1	Breve histórico	27
3.2	Potencialidades do ATP-EMTP	29
3.3	Estrutura do arquivo de entrada padrão ATP-EMTP	30
3.3.1	Formatos de dados	31
3.3.2	Classes de cartões de dados	31
3.4	Pré-processadores gráficos para o ATP-EMTP	34
4	O SOFTWARE DESENVOLVIDO (ATP-SA)	37
4.1	Definição de recursos e requisitos funcionais do software	37
4.1.1	Diagrama de Casos de Uso	40
4.1.2	Diagramas de Atividades	46
4.2	Implementação do software	63
4.2.1	Recursos utilizados	63
4.2.2	Diagramas de Classes	64
4.2.3	Gerenciamento do arquivo padrão ATP-EMTP	78
4.2.4	Interface gráfica	85
5	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	89
5.1	Sistema elétrico abordado	89
5.2	Criação de um novo caso	92
5.3	Seleção do tipo de estudo e procedimento de simulação	94
5.4	Estudo de Curto-circuito	96
5.4.1	Simulação determinística	96
5.4.2	Simulação estocástica	100
5.5	Estudo de Energização de TR	103
5.5.1	Simulação determinística	103
5.5.2	Simulação estocástica	106
5.6	Estudo de TRT em Disjuntor	108

5.7	Estudo de Manobras de Disjuntor	110
5.7.1	Simulação determinística	110
5.7.2	Simulação estocástica	111
5.8	Estudo de Descargas Atmosféricas	113
5.8.1	Simulação determinística	113
5.8.2	Simulação estocástica	114
6	CONCLUSÃO	117
6.1	Continuidade do trabalho	118
6.2	Publicações	119
	REFERÊNCIAS	121
	APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE SUBATIVIDADES	125
	APÊNDICE B – MODELS PARA A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE CURTOS-CIRCUITOS	131
	APÊNDICE C – MODELS PARA A SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA DE ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR	133
	APÊNDICE D – MODELS PARA A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR	135
	APÊNDICE E – MODELS PARA A SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA DE TRT EM DISJUNTOR	137
	APÊNDICE F – MODELS PARA A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE MANOBRAS DE DISJUNTOR	141
	APÊNDICE G – MODELS PARA A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	143

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potências (SEPs) estão sujeitos a uma série de eventos de origem interna e externa, capazes de provocar alterações súbitas em seu regime de funcionamento. Desta forma, a energia eletromagnética e eletromecânica do sistema está constantemente sendo redistribuída entre suas partes. O tempo necessário à acomodação do sistema em decorrência destas trocas de energia é caracterizado como período transitório.

Dentre os eventos precursores de transitórios em SEPs, destaca-se a ocorrência e eliminação de curtos-circuitos, energização de transformadores, energização e religamento de linhas de transmissão e incidência de descargas atmosféricas. As subestações, parte integrante dos SEPs, também são afetadas por estes eventos. Em vista disso, o conhecimento dos transitórios envolvidos é fundamental para a manutenção do funcionamento correto destas instalações, visto que seus equipamentos devem suportar as solicitações elétricas e mecânicas impostas durante a ocorrência destes eventos.

Para a análise de transitórios de natureza eletromagnética em subestações e nos sistemas elétricos em geral, as primeiras ferramentas utilizadas baseavam-se na representação do sistema através de componentes elétricos equivalentes. Simuladores analógicos como este são conhecidos como “Analisador de Transitórios em Redes” (*Transient Network Analyzer – TNA*), no entanto, são raramente empregados hoje em dia.

Com a evolução dos computadores, programas digitais ganharam destaque para a simulação destes fenômenos. Dentre os mais reconhecidos simuladores deste tipo está o ATP-EMTP (*Alternative Transients Program*, versão alternativa do *Electromagnetic Transients Program*). Atualmente, o ATP-EMTP é um dos softwares mais empregados para a análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia. Além disso, também é comumente utilizado na análise dinâmica de eventos eletromecânicos e transitórios envolvendo sistemas de controle de SEPs.

Para utilizar o ATP-EMTP, o usuário precisa fornecer um arquivo de entrada com formato padrão, contendo a parametrização da simulação e a configuração do sistema elétrico a ser simulado. No entanto, além do conhecimento especializado a respeito dos modelos disponíveis no software, esta tarefa exige uma compreensão da sintaxe e da formatação desse arquivo.

Com intuito de facilitar a utilização do ATP-EMTP, alguns softwares pré-processadores gráficos, como o ATPDraw (HOIDALEN, 2016) e o ATPDesigner[®] (Power Engs, 2016), lhe proporcionam uma interface gráfica. Estes criam automaticamente o arquivo de entrada do programa a partir de um diagrama representativo do sistema.

No entanto, embora estes softwares viabilizem a criação do arquivo padrão do ATP-EMTP, a representação de elementos do sistema ainda requer um bom conhecimento a respeito dos modelos disponíveis no programa. Da mesma forma, para a representação de eventos precursores de transitórios na simulação, o usuário precisa compreender os mecanismos de formação do fenômeno e identificar parâmetros relevantes à sua modelagem.

Para a análise de eventos em um sistema específico, como uma subestação, os recursos disponibilizados pelos pré-processadores gráficos mencionados são ainda mais limitados, visto que foram desenvolvidos para aplicações genéricas. Neste contexto, encontrou-se motivação para o desenvolvimento do software apresentado neste trabalho.

O presente trabalho integra outros temas de pesquisa, sendo o objetivo final de um projeto de P&D desenvolvido pelo Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência (LAPES-CEESP) da UFSM, em parceria com a Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT) do Rio Grande do Sul. Este projeto está registrado na CEEE-GT sob o número 9947883 e na Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC) sob o número 3.07.0060.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Atualmente, o ATPDraw e o ATPDesigner[®] oferecem recursos básicos para a representação de alguns eventos precursores de transitórios eletromagnéticos em subestações, tais como chaves ideais controladas para a simulação de manobras de disjuntores e formas de onda para modelagem de descargas atmosféricas. Estes recursos são baseados em componentes elementares presentes no ATP-EMTP.

No entanto, para utilizar modelos mais fieis a realidade, o usuário precisa modelar o evento de interesse a partir de componentes fornecidos por estes programas. Embora seja possível, a criação de novas configurações geralmente envolve um processo investigativo e laborioso para

sua implementação. Além disso, o tempo demandado neste trabalho muitas vezes inviabiliza sua realização, principalmente em aplicações fora do âmbito acadêmico.

Outra deficiência destes softwares diz respeito a inexistência de recurso para gerenciamento das simulações realizadas. Quando modificações são feitas em um mesmo arquivo, por exemplo, para a simulação de um novo evento no mesmo sistema elétrico, as informações e resultados gerados anteriormente são perdidos, a menos que precauções sejam tomadas pelo usuário.

Em vista de limitações como estas, o presente trabalho propõe um novo software que visa preencher lacunas funcionais deixadas pelos pré-processadores gráficos para o ATP-EMTP já existentes. Sua aplicação será voltada especificamente para subestações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolvimento de um software pré-processador gráfico para o ATP-EMTP que auxilie a simulação e a análise de eventos precursores de transitórios eletromagnéticos em subestações.

1.2.2 Objetivos específicos

- Facilitar a modelagem no ATP-EMTP de eventos precursores de transitórios eletromagnéticos em subestações;
- Fornecer valores predefinidos (*default*) para a modelagem dos eventos contemplados;
- Proporcionar a simulação estocástica destes eventos através das funcionalidades adicionadas na versão do ATP-EMTP personalizada pelo LAPES-CEESP;
- Recomendar valores para parâmetros de simulação, tais como passo de integração e tempo total de simulação, compatíveis com o fenômeno a ser estudado;
- Facilitar o gerenciamento das variáveis (“nós” de medição) monitoradas na simulação;
- Prover e gerenciamento de arquivos de entrada e saída do ATP-EMTP através de um banco de dados;
- Fornecer suporte à análise de resultados das simulações.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para melhor organização e relato das atividades realizadas no desenvolvimento do presente trabalho, este documento foi dividido em seis capítulos:

- O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, a justificativa e motivação para sua realização e os objetivos almejados.
- No capítulo 2, realiza-se uma sucinta revisão da literatura a respeito de fenômenos transitórios eletromagnéticos, buscando identificar os eventos mais frequentes e relevantes em subestações;
- O capítulo 3 apresenta um breve histórico sobre o desenvolvimento do ATP-EMTP, suas principais potencialidades e a estrutura padrão de seu arquivo de entrada. Além disso, apresenta dois pré-processadores gráficos para ATP-EMTP atualmente existentes;
- O capítulo 4 relata as etapas de definição de requisitos e implementação de recursos funcionais do software proposto neste trabalho.
- No capítulo 5, aborda-se alguns exemplos de aplicação do software desenvolvido, buscando evidenciar suas potencialidades para simulação e análise de transitórios eletromagnéticos em subestações.
- No capítulo 6 é apresentada a conclusão e as considerações finais do trabalho, oferecendo-se sugestões para sua continuidade. Neste capítulo, são também apresentadas as publicações, frutos do trabalho realizado.

2 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SUBESTAÇÕES

Este capítulo apresenta uma breve revisão da literatura a respeito de fenômenos transitórios eletromagnéticos, buscando identificar os eventos mais frequentes e relevantes em subestações. Além disso, busca-se referência para a definição dos valores *default* a serem indicados pelo software desenvolvido na configuração dos estudos realizados.

2.1 ASPECTOS GERAIS

De um modo geral, eventos externos ou internos ao sistema podem provocar alterações no comportamento de suas variáveis elétricas, como correntes, tensões e frequências. Um dos aspectos cruciais a ser analisado nestes distúrbios são as sobretensões geradas no sistema. De acordo com seu grau de amortecimento e tempo de duração, pode-se fazer distinção em duas categorias: sobretensões temporárias e sobretensões transitórias.

Segundo a ABNT NBR 6939 (2000), sobretensões temporárias são caracterizadas por frequência fundamental de duração relativamente longa, enquanto que sobretensões transitórias são de curta duração, geralmente fortemente amortecidas. As sobretensões transitórias podem ser classificadas em frente lenta, com tempo de crista entre $20 \mu s < T_{cr} \leq 5000 \mu s$ e tempo de decaimento $T \leq 20 \text{ ms}$; em frente rápida com tempo de crista $0,1 \mu s < T_{cr} \leq 20 \mu s$ e tempo de decaimento $T \leq 300 \mu s$. A Tabela 2.1 apresenta esta classificação para alguns eventos precursores de sobretensões transitórias.

Tabela 2.1 – Relação entre eventos e sobretensões produzidas

Evento	Sobretensões	Sobretensões Transitórias	
	Temporárias	Frente Lenta	Frente Rápida
Rejeição de carga	X		
<i>Inrush</i> de transformador	X	X	
Energização de linhas	X	X	
Ocorrência de curto-circuito	X	X	
Eliminação de curto-circuito	X	X	
Descarga atmosférica direta			X

Fonte: (IEC TR 60071-4, 2004).

2.2 CURTOS-CIRCUITOS

Os curtos-circuitos são eventos de ocorrência frequente em sistemas elétricos, sendo importantes nos estudos de sobretensões transitórias. Neste caso, há dois momentos distintos que podem ser analisados. Um compreende o instante da ocorrência do curto-circuito e o outro ao instante de abertura dos disjuntores para isolar eletricamente o ponto de falta do sistema.

No primeiro instante, porém, não é comum a ocorrência de sobretensões elevadas. Já no segundo, verifica-se sobretensões elevadas, podendo exceder o valor de 1,7 p.u. (D'AJUZ et al., 1987). Estas sobretensões podem se manifestar tanto nas fases sob falta como nas fases “sãs” do sistema. Nestes casos, tais informações são de grande relevância para a especificação de disjuntores e na seleção de para-raios, uma vez que estes são escolhidos de modo a não atuarem dinamicamente para esta manobra para não exceder sua capacidade de absorção de energia.

Na análise de eliminação de curtos-circuitos, é necessário variar a sequência de abertura dos polos de disjuntores, procurando-se obter os casos mais críticos de sobretensões resultantes. Outros fatores que influenciam a eliminação das faltas, é sua natureza e local, o comprimento da linha de transmissão, o grau de aterramento do sistema, bem como o grau de compensação da linha de transmissão.

Além das sobretensões, outro aspecto importante a ser analisado em estudos de curto-circuito são as sobrecorrentes geradas em decorrência destes eventos. Tais valores são considerados no projeto e análise de superação de equipamentos, principalmente os disjuntores.

Para esse fenômeno, a maioria das ocorrências caracterizam-se por serem curtos-circuitos monofásicos. Dessa maneira, a probabilidade das maiores sobretensões está associada não somente aos fatores estatísticos que caracterizam a própria ocorrência, mas também à probabilidade de acontecer o defeito específico (NUNES, 2006).

De acordo com Kindermann (2010), considerando-se os diferentes setores do SEPs – geração, subestação e transmissão – cada um possui características e funções diferenciadas, as quais podem contribuir positivamente ou negativamente na ocorrência do curto-circuito. As contribuições de cada setor do sistema de energia elétrica são obtidas através de averiguações estatísticas no histórico de defeitos das empresas de energia, dispostas na tabela Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Estatística de defeitos nos setores de SEPs.

Setor do Sistema Elétrico	Ocorrência de curto-circuito
Geração	6%
Subestação	5%
Linhas de Transmissão	89%

Fonte: (KINDERMANN, 2010).

Percebe-se que em um SEP as linhas de transmissão são as mais vulneráveis ao acometimento de curtos-circuitos devido sua grande dimensão física, pois ficam expostas a climas distintos, a descargas atmosféricas e posicionam-se em terrenos de condições variadas. Considerando-se a ocorrência dos tipos de curtos-circuitos em SEPs, de acordo com a Tabela 2.3, nota-se que o fase-terra é o mais frequente (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP., 1950).

Tabela 2.3 – Estatística dos tipos de curto-circuito no SEP.

Tipo de Curto-Circuito	Percentual de ocorrência
Trifásico	5%
Bifásico	10%
Bifásico-Terra	15%
Monofásico	70%

Fonte: (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP., 1950, p. 358).

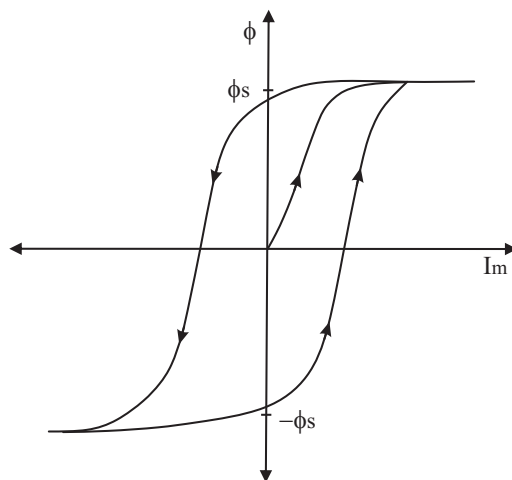
2.3 ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES

A energização de transformadores de potência podem gerar forte conteúdo de harmônicos, baixo amortecimento e altas correntes transitórias devido às características de saturação do seu núcleo. Uma das principais preocupações acerca da corrente de magnetização está na possibilidade de sensibilizar os dispositivos de proteção sendo confundida com uma corrente de curto-circuito.

O núcleo do transformador opera, em condições normais, conforme a sua curva de histerese semelhante a da Figura 2.1. Tal curva pode ser analisada em duas regiões distintas. A primeira, até quando o enlace do fluxo atingir o valor ϕ_s , que corresponde à operação em regime permanente, fazendo com que o transformador se comporte como elemento essencialmente linear.

A segunda, após o ponto ϕ_s , cuja corrente de excitação aumenta muito rapidamente podendo ultrapassar a corrente nominal. Neste caso ocorre a saturação do seu núcleo. Nesta região, as variações na tensão provocam grandes variações de corrente de magnetização. Sendo assim, corrente presente nos enrolamento primários é a corrente de excitação transitória, também conhecida como corrente de *inrush* (ARAÚJO; NEVES, 2005).

Figura 2.1 – Curva característica de histerese.



Fonte: Adaptado de D'ajuz et al. (1987).

Alguns fatores contribuem para caracterizar a amplitude e a duração da corrente de magnetização. Entre os principais fatores destacam-se o tamanho do banco transformador, a robustez do sistema de energia, as características construtivas do transformador, como o tipo e qualidade do material ferromagnético, e a existência ou quantidade de fluxo residual (ANDERSON; J.ERIKSSON, 1980).

Segundo D'ajuz et al. (1987), a situação que apresenta o fluxo de transitório máximo, é aquela em que o transformador é energizado no instante em que a tensão passa por zero e o fluxo magnético pelo seu valor máximo negativo. Esta condição extrema, está ligada ao maior risco de saturação do transformador.

Na corrente de *inrush* verificam-se todas as ordens de harmônicas, mas o destaque está nas segundas e terceiras componentes, cujas amplitudes são superiores que as demais. A segunda harmônica está presente em todas as formas de onda da corrente de magnetização, e sua amplitude varia de acordo com o grau de saturação do transformador.

Em sobretensões oriundas pela energização de transformador, a saturação do núcleo geralmente atua como se fosse um limitador, reduzindo a magnitude e distorcendo a forma de onda, devido à forte injeção de harmônicos na rede. Entretanto, caso a impedância harmônica seja muito elevada, é possível que as sobretensões também sejam elevadas. Via de regra, o amortecimento é baixo, pois a corrente de *inrush* permanece por muito tempo, considerando que as perdas no ferro costumam ser pequenas.

2.4 MANOBRAS DE DISJUNTORES

Sobretensões de manobra resultam da modificação brusca na configuração do sistema, abertura ou fechamento de circuitos, por isso são classificados como de origem interna. Através dos estudos de sobretensões pode-se definir as amplitudes, as frequências esperadas e as características das sobretensões temporárias e transitórias.

Os efeitos das sobretensões transitórias de manobra, atingem valores mais elevados em relação às sobretensões temporárias, por essa razão é um fator determinante no projeto econômico dos sistemas elétricos, tanto para equipamento de subestações, quanto para linhas de transmissão. Os resultados de tais estudos definem os requisitos de isolamento e de dispositivos necessários para minimizar as sobretensões excessivas, além das especificações dos equipamentos de proteção.

Os transitórios originados por manobras são associados a eliminação de curtos-circuitos, energização de transformadores, energização e religamento de linhas de transmissão. Devido a sua importância, alguns destes eventos são tratados distintamente neste capítulo.

A amplitude e a duração das sobretensões de manobra dependem dos parâmetros do sistema, da sua configuração e das condições em que o sistema se encontra no momento da manobra. Para um mesmo sistema, a mesma operação, efetuada em momentos diferentes, pode resultar em valores diferentes de sobretensão e também pode causar efeitos diferentes.

Por esses motivos, é de grande interesse a análise de sobretensões de manobras sob o aspecto probabilístico. As sobretensões dependerão não só da dispersão dos instantes de fechamento do disjuntor, como também do instante de ocorrência.

Conforme pode-se observar na Tabela 2.4, a análise e medidas das sobretensões estabeleceram faixas gerais de amplitude esperadas. Mesmo assim, D'ajuz et al. (1987) afirma que os valores podem diferir consideravelmente destes listados devido ao valor das impedâncias da rede, comprimento das linhas de transmissão, das características dos disjuntores e das condições da manobra .

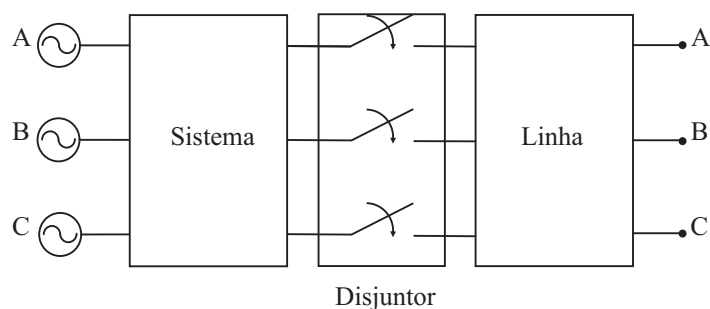
Tabela 2.4 – Valores máximos de tensão fase-terra para diferentes tipos de manobra.

Tipo de Manobra	Desvio Padrão	Valor Máximo [p.u.]	
		Início Linha	Fim Linha
Energização de linhas	15 a 20	1,5 a 2,5	2,0 a 3,0
Religamento tripolar	10 a 25	2,0 a 3,0	3,0 a 5,0
Religamento monopolar		< 2,0	1,8 a 2,5
Eliminação de curto		< 2,0	< 2,5
Ocorrência de curtos		1,3 a 1,6	1,6 a 2,2
Abertura de cargas indutivas		2,5	2,5
Abertura de linhas em vazio		1,3 a 1,5	1,3 a 1,5

Fonte: Adaptado de (D'AJUZ et al., 1987).

O fenômeno de manobras no sistema elétrico pode ser representado sob o ponto de vista trifásico conforme a Figura 2.2. A partir desta configuração, é importante ressaltar que os três polos do disjuntor não operam efetivamente ao mesmo tempo.

Figura 2.2 – Ilustração de um disjuntor em um circuito trifásico.

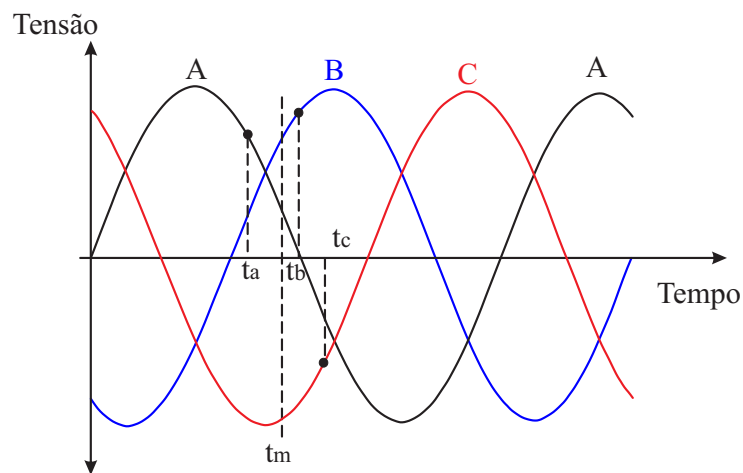


Fonte: Adaptado de Zanetta (2003).

Para reproduzir esta dispersão presente na operação de abertura e fechamento de disjuntores, há necessidade de incluir a aleatoriedade na modelagem do evento. As diferenças mecânicas dos polos, o momento no ciclo em que o comando da operação é feito e o arco elétrico que se estabelece entre os contatos determinam os instantes de abertura ou fechamento efetivo.

A Figura 2.3 ilustra o processo de manobra tripolar de um disjuntor em um sistema trifásico. Nesta figura, t_m representa o instante em que o comando da operação é enviado. No entanto, devido aos fenômenos aleatórios citados, a operação poderá não ocorrer efetivamente nesse instante em todas as fases. Nesta figura, t_a , t_b e t_c representam os instantes efetivos de operação das fases “a”, “b” e “c”, respectivamente.

Figura 2.3 – Operação de um disjuntor com dispersão de polos no circuito trifásico.



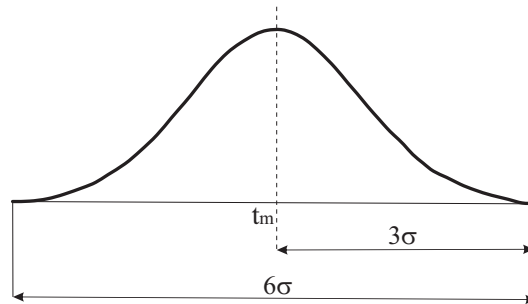
Fonte: Adaptado de Zanetta (2003).

Para representar o efeito da dispersão de polos em uma simulação de manobra de disjuntor, pode-se empregar uma distribuição de probabilidade normal. O parâmetro a ser considerado nesta representação é o ângulo relacionado ao máximo tempo de dispersão entre os polos, representado por θ_{max} . O valor deste parâmetro é normalmente fornecido nas especificações de fabricantes de disjuntores. No entanto, Zanetta (2003) sugere que a dispersão máxima entre a operação da primeira e da última fase esteja dentro do limite de 5 ms ($t_c - t_a < 5$ ms).

Embora a curva de distribuição normal varie entre $-\infty$ e $+\infty$, Camm, Natarajan e Martinez (2000) sugerem truncá-la no valor referente a três desvios padrões em ambos os lados da média, conforme ilustrado na Figura 2.4. Desta forma, a partir do valor de θ_{max} , pode-se determinar o desvio padrão σ da distribuição normal através da Equação 2.1.

$$\sigma = \frac{\theta_{max}}{6} \quad (2.1)$$

Figura 2.4 – Distribuição normal utilizada para modelar a dispersão entre polos de disjuntores.



Fonte: Adaptado de Taschini e Clerici (1970).

2.5 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas são fenômenos importantes a serem analisados em um diagnóstico de sobretensões em sistemas elétricos, devido à configuração predominantemente aérea e a grande extensão das linhas de transmissão, bem como o grande número de subestações desabrigadas (ZANETTA, 2003).

Os transitórios eletromagnéticos originados por descargas atmosféricas são classificadas como de frente de onda rápida, por serem de curta duração e possuírem tempos de decaimento inferiores a $300 \mu\text{s}$ (IEC TR 60071-4, 2004). Em subestações, assim como nos demais componentes dos sistemas elétricos em geral, as descargas podem produzir surtos essencialmente de duas maneiras: por incidência direta nos condutores ou equipamentos; e por indução, através do acoplamento de campos eletromagnéticos com os condutores.

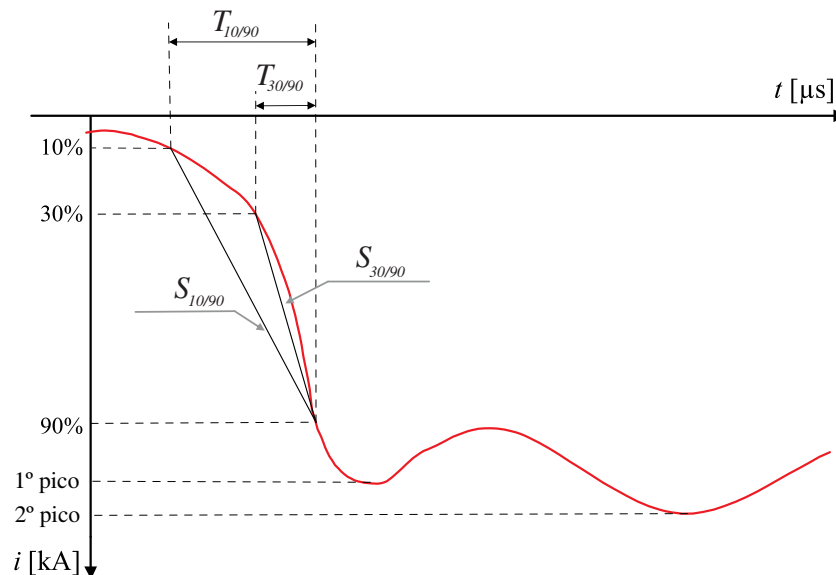
Os transitórios provocados por descargas indiretas são fenômenos mais frequentes, no entanto, provocam surtos com amplitudes relativamente reduzidas, sendo mais relevantes em sistemas de distribuição de energia elétrica. Já a incidência direta sobre os condutores fase ou equipamentos, apesar de menos frequentes, acarretam transitórios mais severos, podendo ocasionar a atuação de relés de proteção.

Um conhecimento mais exato dos parâmetros das descargas atmosféricas é essencial para realização de simulações e previsão da severidade dos surtos que poderão atingir o sistema elétrico. Uma análise estocástica do fenômeno apresenta relevância para estudos de coordenação de isolamento.

2.5.1 Parâmetros típicos da onda de descarga

As primeiras caracterizações dos parâmetros das descargas atmosféricas foram realizadas por Berger et al. (1975), sendo posteriormente complementados por Anderson e J.Eriksson (1980). Através do resultado de tais pesquisas, foi derivada a Figura 2.5, válida para descargas descendentes negativas. Dentre este conjunto de parâmetros, os potencialmente capazes de influenciar no valor dos surtos gerados correspondem a corrente de pico (corrente máxima), ao tempo de frente e ao tempo de cauda,

Figura 2.5 – Forma de onda típica de uma corrente de retorno nuvem-solo negativa.



Fonte: Adaptado de CIGRE (1991)

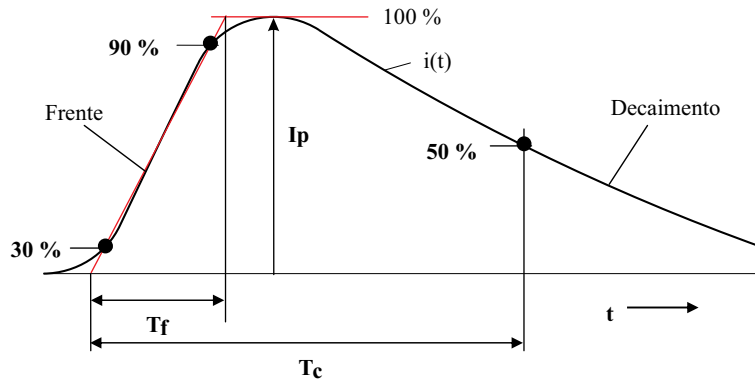
Corrente de pico (I_p): corresponde ao valor de pico ou amplitude da onda de corrente. Este é o parâmetro físico da corrente de descarga considerado de maior interesse, pois determina os níveis máximos de solicitação imposta aos componentes do sistema. Logo é o parâmetro crítico para o dimensionamento do isolamento e definição de práticas de proteção. As ondas da primeira corrente de descarga negativa apresentam dois picos, geralmente o segundo pico superior ao primeiro, sendo o primeiro pico determinante para a definição dos outros parâmetros.

Tempo de Frente (T_f): corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do primeiro pico. Usualmente, alguns procedimentos definem o tempo de frente, assumindo como referência os instantes em que são atingidos os valores fixos percentuais em relação ao primeiro pico da onda de corrente.

É comum na literatura a utilização do intervalo de tempo entre os valores 30% e 90% do valor do pico da onda correspondente, indicado na Figura 2.5 pelo parâmetro $T_{30/90}$ (VISACRO, 2005). A influência deste parâmetro na perspectiva de aplicações, relaciona-se ao comportamento dos isolamentos dos sistemas elétricos no que se refere à suportabilidade das sobretensões.

Tempo de Cauda (T_c): é caracterizado como tempo decorrido entre o início da onda impulsiva e o instante em que a corrente, após ter ultrapassado o valor de pico, tem sua intensidade reduzida a 50% deste valor. Este parâmetro está evidenciado na Figura 2.6, que identifica mais nitidamente os três parâmetros descritos.

Figura 2.6 – Identificação dos parâmetros típicos para modelagem de descargas atmosféricas.



Fonte: Adaptado de Heidler et al. (2008)

Os parâmetros característicos da corrente de descarga atmosférica anteriormente definidos têm grande dispersão estatística, a qual deve ser considerada nas simulações de transitórios eletromagnéticos através de uma distribuição de probabilidade log-normal. Na Tabela 2.5 são exibidos alguns dados estatísticos apresentados pelo CIGRE (1991) e revisados pelo *IEEE Lightning and Insulator Subcommittee* (CHOWDHURI et al., 2005), provenientes de uma compilação de estudos realizados por diversos autores e medições de descargas atmosféricas.

Tabela 2.5 – Parâmetros da distribuição log-normal para descargas descendentes negativas.

Parâmetro	Mediana	Desvio Padrão
Tempo de Cauda T_c	77,5 μs	0,577 μs
Tempo de Frente T_f	3,83 μs	0,553 μs
Corrente de Pico I_p	31,1 kA	0,484 kA

Fonte: CIGRE (1991) e Chowdhuri et al. (2005).

2.5.2 Representação da forma de onda da corrente de descarga

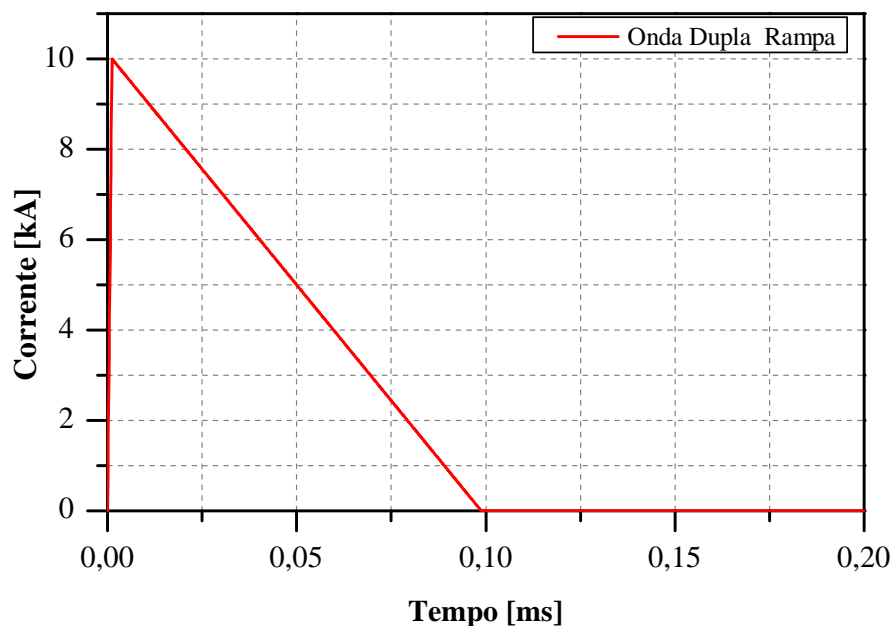
Para fins de simulação em ambientes laboratoriais e em simuladores digitais, a forma de onda da corrente de descarga pode ser representada de maneira simplificada por uma fonte ideal modelada através da função Dupla Rampa, também conhecida como rampa triangular. Segundo Visacro (2005), embora esta forma de onda não reflita certas características de curva original, como a frente de onda côncava, possibilita a simulação de sobretensões suficientemente representativas.

Outra vantagem desta simplificação, reside no fato de que não há necessidade de ajuste preliminar dos parâmetros, já que é completamente especificada pela corrente de pico I_p , tempo de frente T_f , e tempo de cauda T_c . Esta curva é obtida através da Equação 2.2 (rampa de subida) e da Equação 2.3 (rampa de descida), representada através da Figura 2.7.

$$i(t) = \frac{I_p}{T_f} \quad (2.2)$$

$$i(t) = -\frac{I_p}{2(T_c - T_f)}(T_c - T_f) + I_p \quad (2.3)$$

Figura 2.7 – Exemplo de onda Dupla Rampa com: $I_p = 10 \text{ kA}$, $T_f = 1,2 \mu\text{s}$, $T_c = 50 \mu\text{s}$.



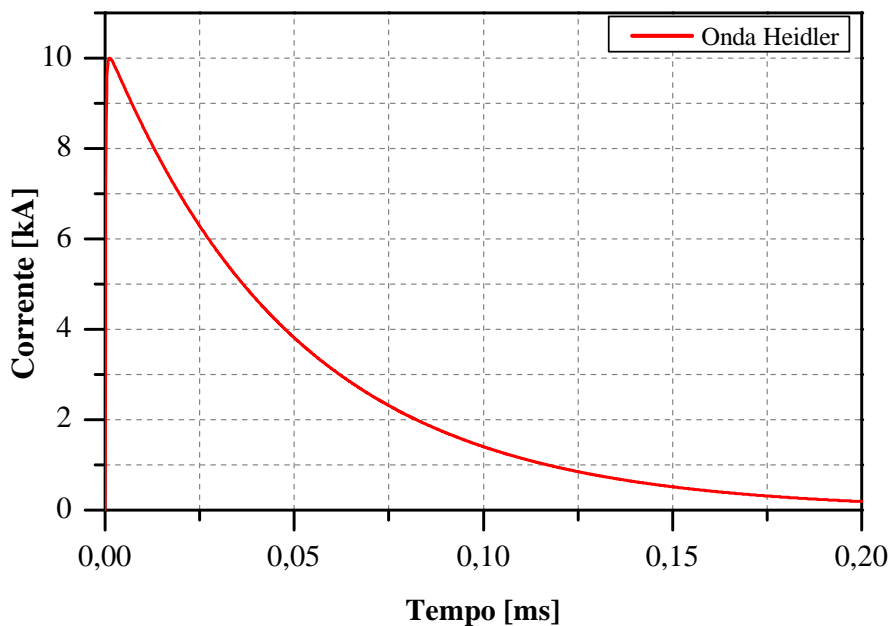
Outra forma de onda muito utilizada na literatura para representação de descargas atmosféricas é conhecida como onda Heidler (CVETIC; STANIC; HEIDLER, 1999). Esta constitui uma expressão analítica, concebida através de dados obtidos na observação das correntes de retorno em torres monitoradas com instrumentação específica. A curva, exibida na Figura 2.8, é obtida através da Equação 2.4, e permite o ajuste, de forma independente, da amplitude da corrente, da derivada máxima da corrente e carga transferida através das constantes I_p , τ_1 e τ_2 .

$$i(t) = \frac{I_p}{\eta} \frac{\left(\frac{1}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{1}{\tau_1}\right)^n} e^{\left(-\frac{1}{\tau_2}\right)} \quad (2.4)$$

Onde:

- n = parâmetro de forma (2 a 10);
- η = fator de correção de amplitude;
- τ_1 = coeficiente relacionado ao tempo de frente;
- τ_2 = coeficiente relacionado ao tempode cauda.

Figura 2.8 – Exemplo de onda Heidler com: $I_p = 10$ kA, $T_f = 1,2$ μ s, $T_c = 50$ μ s.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 O ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP-EMTP)

Neste capítulo, apresenta-se um breve histórico sobre o desenvolvimento do ATP-EMTP, listando suas principais potencialidades para análise de transitórios em sistemas elétricos. Além disso, é realizada uma abordagem sobre a estrutura padrão de seu arquivo de entrada, conhecimento fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Ao final, são apresentados dois pré-processadores gráficos existentes, que visam facilitar o processo de criação do arquivo de entrada do ATP-EMTP, com destaque especial para o software ATPDraw.

3.1 BREVE HISTÓRICO

O desenvolvimento do *ElectroMagnetic Transients Program* (EMTP) teve início na *Technical University Munich*, Alemanha, na década de 1960, com o trabalho de doutorado (*Doktor-Ingenieur*) do professor Hermann W. Dommel (DOMMEL, 1969). Nesta fase, o programa realizava apenas simulações de circuitos monofásicos e comportava um número reduzido de modelos. Em continuidade, seu desenvolvimento passou a ser custeado pela *Bonneville Power Administration* (BPA) que buscava um substituto digital para o analógico *Transient Network Analyzer* (TNA) (EPRI, 1986).

Em 1973, o professor Dommel foi para a *University of British Columbia* em Vancouver, Canadá. Com sua saída da BPA, duas versões do EMTP passaram a ser desenvolvidas separadamente, uma por Dommel, denominada EMTP-UBC (devido ao nome da universidade) e outra pela BPA, denominada EMTP-BPA. A versão EMTP-UBC foi aprimorada nos anos seguintes e em 1987 passou a ser denominada MicroTran[®]. Na BPA, o desenvolvimento do programa passou a ser coordenado pelo Dr. Scott Meyer, com colaboração da Dra. Tsu-Huei Liu.

Dr. Meyer estabeleceu um processo articulado de trabalho, reunindo contribuições de diversas universidades, fabricantes e concessionárias de energia elétrica, tornando o EMTP da BPA uma ferramenta poderosa para estudos de transitórios em sistemas elétricos. No entanto, a incorporação de ferramentas e modelos desenvolvidos por usuários acarretou a ocorrência de erros e carência de documentação formal.

Com intuito de estabelecer diretrizes para o desenvolvimento do programa e angariar fundos de outras organizações, fundou-se o *EMTP Development Coordination Group* (DCG)

em 1982. O DCG originalmente era formado por três agências governamentais americanas: BPA, *U.S. Bureau of Reclamation* (USBR) e *Western Area Power Administration* (WAPA); e três organizações canadenses: *Hydro-Québec/IREQ*, *Ontario Hydro*, e *Canadian Electrical Association* (CEA).

Os membros do DCG inicialmente concordaram em manter o EMTP como domínio público, no entanto, com a associação do *Electric Power Research Institute* (EPRI) em 1984, o comitê iniciou uma tentativa de comercialização do programa. No entanto, esta ideia não era de consentimento dos Drs. Meyer e Liu e, tampouco agradou os grupos de usuários estrangeiros que haviam colaborado com o desenvolvimento do EMTP durante anos. Quando a proposta de comercialização foi oficializada, Dra. Liu em protesto renunciou ao cargo de presidente do DCG, e Dr. Meyer começou a dedicar seu tempo extra para analisar alternativas. A “alternativa” encontrada foi o desenvolvimento de um novo programa, intitulado *Alternative Transients Program* (ATP) (MEYER; LIU, 1988).

Dr. Meyer iniciou o trabalho no ATP-EMTP formalmente em agosto de 1984, utilizando seu computador pessoal e contando com a ajuda do visitante chinês Ma Ren-ming, do *Wuhan High Voltage Institute*. Em menos de um ano, o ATP-EMTP já havia se tornado um novo programa distinto, com vantagens substanciais. Em novembro de 1985 ele foi apresentado na Europa, ocasião em que foi proposto o primeiro encontro anual do *Leuven EMTP Center* (LEC) com base no desenvolvimento cooperativo do EMTP não comercial. A adesão ao novo programa se consolidou em 1987 com a realização do primeiro minicurso do ATP-EMTP, oferecido pelo LEC em Leuven, Bélgica, e a disponibilização da extensa documentação do programa denominada *ATP Rule Book* (1987-1998).

No encontro anual do LEC de 1987, firmou-se um acordo de cooperação admitindo grupos de usuários nas mesmas condições que organizações industriais. Este acordo fixou os termos pelos quais o ATP-EMTP seria disponibilizado gratuitamente, que incluem honestidade em todas as relações e não participação no desenvolvimento de versões comerciais do EMTP. Além disso, a habitual taxa de adesão foi extinta em troca de contribuições para o desenvolvimento do programa (MEYER; LIU, 1988). A política de distribuição do ATP-EMTP contribuiu para que o programa se tornasse mundialmente utilizado para a análise de transitórios em sistemas elétricos.

O EMTP do DCG/EPRI continuou sendo desenvolvido até sua versão 3.0 de 1996 (EMTP96). Em 2003, foi lançada uma nova versão reestruturada, denominada EMTP-RV[®], desenvolvida sob a liderança técnica da Hydro-Québec. Atualmente, o EMTP-RV[®] não é considerado uma atualização, mas sim uma substituição completa do EMTP96.

3.2 POTENCIALIDADES DO ATP-EMTP

O ATP-EMTP conta atualmente com uma série de ferramentas e modelos de componentes para simulação de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos, e de controle em sistemas elétricos. Isto é resultado do processo de desenvolvimento colaborativo de vários anos e do empenho contínuo dos Drs. Meyer e Liu.

De acordo com o ATP Rule Book (1987-1998), dentre os modelos de equipamentos e componentes incorporados pelo ATP-EMTP, pode-se citar:

- Resistências, indutâncias e capacitâncias concentradas, desacopladas ou linearmente acopladas;
- Resistências e indutâncias concentradas variáveis;
- Cabos e linhas de transmissão com parâmetros distribuídos, dependentes ou não da frequência;
- Componentes não-lineares, como transformadores e para-raios;
- Chaves controladas por tempo, controladas por tensão e chaves com controle estatístico através do método de Monte Carlo;
- Válvulas, diodos e triacs;
- Fontes analíticas de tensão e corrente do tipo degrau, rampa, cossenoidal, surto e empírica;
- Máquinas síncronas trifásicas e máquina universal.

Sistemas de controle podem ser modelados através de “TACS” (*Transient Analysis of Control Systems*) ou “MODELS”, uma linguagem de programação própria do ATP-EMTP. Estas ferramentas oferecem grande potencialidade para a criação de modelos de novos componentes.

Para auxiliar a modelagem de alguns componentes complexos, o ATP-EMTP disponibiliza rotinas de apoio que auxiliam a determinação de parâmetros do modelo a partir de dados de projeto ou de ensaio. Como exemplo, pode-se citar:

- Rotinas para determinação de parâmetros elétricos de linhas aéreas e cabos: “LINE CONSTANTS”, “CABLE CONSTANTS” e “CABLE PARAMETERS”;
- Rotinas para modelagem de linhas com parâmetros dependentes de frequência: “Semlyen”, “J.Marti” e “Noda”;
- Rotinas para modelagem de transformadores: “XFORMER” e “BCTRAN”;
- Rotinas para conversão de dados da curva de saturação e histerese.

Na realização da simulação no domínio do tempo, o ATP-EMTP emprega a regra de integração trapezoidal para solucionar numericamente o sistema de equações diferenciais. Condições iniciais não nulas podem ser determinadas através de uma solução em regime permanente ou inseridos diretamente pelo usuário. O programa também incorpora recursos para análise no domínio da frequência e de harmônicos através das opções “FREQUENCY SCAN” e “HARMONIC FREQUENCY SCAN”, respectivamente.

3.3 ESTRUTURA DO ARQUIVO DE ENTRADA PADRÃO ATP-EMTP

Para realizar uma simulação no ATP-EMTP, primeiramente, é necessário criar o arquivo de entrada padrão do programa. Este arquivo contém os parâmetros da simulação (como tempo total e passo de integração) e do sistema elétrico analisado. Como todas as diferentes versões do ATP-EMTP (Salford, Watcom, GNU MingW32, GNU Linux, entre outras), tiveram seu código fonte ou ao menos seu núcleo de processamento e resolução de equações (“*Core Solver*”), escrito em linguagem de programação Fortran, o arquivo de entrada segue um padrão rigidamente estruturado com os formatos de dados dessa linguagem.

Além dos formatos de dados, o conhecimento da estrutura e das classes de cartões de dados (fontes, chaves, ramos, entre outras) suportadas pelo ATP-EMTP, é fundamental para a geração correta do arquivo de entrada. Na sequência desta seção, são abordados alguns dos principais itens da estrutura deste arquivo.

3.3.1 Formatos de dados

De acordo com o ATP Rule Book (1987-1998), o formato de dados “*F-field*” da linguagem Fortran possibilita que se determine a posição do separador decimal (“ponto”) em sua especificação numérica, mas não permite a utilização da potência de base dez para deslocar tal separador. Por exemplo, um formato de dados “F10.3” apresenta um total de dez colunas e o usuário pode posicionar o separador decimal dentre qualquer uma destas. O algarismo “3” no final indica que três números decimais, localizados nas três últimas colunas, serão assumidos caso nenhum separador seja definido. Quando a posição do separador decimal for definida, essa possibilidade é ignorada. Já o formato de dados “*E-field*” possibilita a definição de números decimais com potência de base dez e o formato “*I-field*” a definição de números inteiros.

No arquivo de entrada padrão do ATP-EMTP, os valores numéricos devem estar alinhados à direita do campo correspondente, visto que qualquer coluna à direita sem definição é interpretada como o número “0”. No caso da formatação “*E-field*”, se a potência de base dez for explicitamente definida e não nula, espaços vagos a direita do campo serão interpretadas como o número “0” no expoente, alterando significativamente o valor do parâmetro.

O ATP-EMTP utiliza também o formato de dados “*A-field*” que possibilita a inserção de vetores de caracteres (*strings*). O formato “A6” que permite seis caracteres, por exemplo, é utilizado para a definição dos nomes dos “nós” de conexão entre ramos do sistema elétrico. Existe ainda um formato de dados livre, utilizado pelo ATP-EMTP para a inserção de alguns parâmetros, como a frequência de regime permanente do sistema (“POWER FREQUENCY”). Neste formato, os dados são definidos da esquerda para a direita, separados por uma vírgula.

3.3.2 Classes de cartões de dados

Originalmente, a sintaxe da linguagem Fortran foi definida de forma que cada linha do programa fosse escrita em um cartão perfurado, com um carácter por coluna. Em vista disso, a estrutura do arquivo de entrada do ATP-EMTP herdou esta concepção. Embora atualmente seja utilizado um arquivo em formato texto (codificação ASCII), é comum na literatura especializada o emprego do termo “cartões” (“*cards*”) em referência as linhas do arquivo e de “classes de cartões de dados” para os diferentes tipo de dados suportados pelo programa.

De um modo geral, o arquivo de entrada do ATP-EMTP é composto de oitenta colunas, nas quais as informações são arranjadas de acordo com o formato de dados específico. Já as classes de cartões utilizadas dependem do caso (“*data case*”) a ser processado pelo programa, havendo conjuntos de classes essenciais e conjuntos opcionais. A estrutura completa do arquivo de entrada utilizado para a simulação de um caso padrão de transitório apresentado pelo ATP Rule Book (1987-1998) é composta de:

Quadro 3.1 – Estrutura completa do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP.

BEGIN NEW DATA CASE
C_____
Localização dos dois cartões de dados miscelâneos
C_____
Localização de cartões de componentes modelados através de TACS ou MODELS
BLANK encerra todos os cartões TACS e MODELS, se existirem (opcional)
C_____
Localização de dados de resistores, indutores, capacitores, transformadores, linhas e demais elementos do tipo BRANCH
BLANK encerra todos os cartões BRANCH
C_____
Localização de chaves e demais elementos do tipo SWITCH
BLANK encerra todos os cartões SWITCH
C_____
Localização de parâmetros de fontes de tensão e corrente ideais em suas diferentes variações: cossenoidal, rampa, entre outras
BLANK encerra todos os cartões SOURCE
C_____
Localização de cartões de fluxo de potência
C_____
Localização de cartões que sobrescrevem condições iniciais, provenientes da solução em regime permanente
C_____
Localização das variáveis a serem incluídas no arquivo de saída “.pl4”
BLANK encerra todos os cartões OUTPUT, se a especificação for seletiva
C_____
Localização de cartões para especificação de fontes EMTP tipo 1-10 ponto-a-ponto
C_____
Localização de cartões para plotagem de resultados em modo <i>Batch</i>
BEGIN NEW DATA CASE

A disposição das classes de cartões apresentada anteriormente deve ser seguida rigorosamente para evitar erros na leitura dos dados. No entanto, como em vários casos as simulações utilizam apenas alguns dos grupos indicados e para proporcionar maior flexibilidade no cadastro dos dados, o programa aceita também a seguinte estrutura de classes:

Quadro 3.2 – Estrutura flexível do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP.

<p>BEGIN NEW DATA CASE Localização dos dois cartões de dados miscelâneos</p> <p>/TACS Localização de cartões de componentes modelados por TACS, se existirem</p> <p>BLANK TACS</p> <p>/MODELS Localização de cartões de componentes modelados por MODELS, se existirem</p> <p>ENDMODELS</p> <p>/BRANCH Localização de dados de resistores, indutores, capacitores, transformadores, linhas e demais elementos do tipo BRANCH</p> <p>/SWITCH Localização de chaves e demais elementos do tipo SWITCH</p> <p>/SOURCE Localização de parâmetros de fontes de tensão e corrente ideais em suas diferentes variações: cossenoidal, rampa, entre outras</p> <p>/OUTPUT Localização das variáveis a serem incluídas no arquivo de saída “.pl4”</p> <p>BLANK BRANCH</p> <p>BLANK SWITCH</p> <p>BLANK SOURCE</p> <p>BLANK OUTPUT</p> <p>BEGIN NEW DATA CASE</p> <p>BLANK</p>

Conforme descrito na seção 3.2, o ATP-EMTP dispõe de rotinas auxiliares para a modelagem de alguns componentes, como linhas e transformadores. Para utilizar este recurso, o usuário deve informar no arquivo de entrada um cartão especial de requisição com a palavra-chave da rotina desejada imediatamente após o cartão “BEGIN NEW DATA CASE”. São exemplos de cartões de requisição de rotinas auxiliares: “LINE CONSTANTS”, “XFORMER” e “DATA BASE MODULE”.

Neste caso, a estrutura do arquivo de entrada é diferente da apresentada anteriormente, sendo dependente do tipo de rotina executada. Maiores detalhes sobre as classes de cartões destas rotinas podem ser acessadas no ATP Rule Book (1987-1998).

3.4 PRÉ-PROCESSADORES GRÁFICOS PARA O ATP-EMTP

Pelo que foi exposto na seção 3.3, devido a sua concepção, o arquivo de entrada do ATP-EMTP possui um formato rigidamente preestabelecido de alocação de dados. A montagem deste arquivo requer um bom conhecimento de sua estrutura, pois uma vez que a mesma não seja seguida, erros poderão ocorrer na leitura dos dados ou no processamento da simulação. Para minimizar erros como estes e facilitar a utilização do ATP-EMTP, dispõe-se atualmente de softwares pré-processadores gráficos compatíveis com o padrão “WYSIWYG” (“*What You See Is What You Get*”) dos modernos sistemas operacionais.

Softwares como estes fornecem uma interface gráfica para o ATP-EMTP, a partir da qual o usuário pode construir um circuito elétrico usando o “*mouse*”, selecionando componentes pré-definidos em uma “paleta”. A partir do desenho gráfico do circuito, o programa gera automaticamente o arquivo padrão de entrada e executa a simulação no ATP-EMTP.

O primeiro software pré-processador gráfico desenvolvido para o ATP-EMTP é denominado ATPDraw. De acordo com Prikler e Hoidalén (1998), uma versão bastante rudimentar do software foi desenvolvida para fins educacionais no *Norwegian Institute of Technology* em 1991. Posteriormente, duas versões demonstrativas foram apresentadas nas reuniões anuais do LEC/EEUG (*European EMTP Users Group*) em 1991 e 1992. Nesta oportunidade, a BPA entrou em contato com os desenvolvedores com a intenção de financiar um maior desenvolvimento do programa.

A primeira fase do projeto de desenvolvimento financiado pela BPA foi concluída em maio de 1994 e o programa foi disponibilizado para usuários através da internet, juntamente com seu manual. Na segunda etapa do projeto, concluída em dezembro de 1995, algumas limitações importantes da versão anterior foram solucionadas. Em seguida, o ATPDraw foi totalmente reescrito em linguagem de programação Delphi para ser executado nas versões de 16 bits dos ambientes operacionais Windows 3.x (HOIDALEN, 1997). Com apoio da BPA, o programa

continua sendo aprimorado e hoje se encontra na versão 6.0, sendo compatível com os atuais sistemas operacionais Windows.

Atualmente, o ATPDraw pode ser considerado o pré-processador gráfico mais utilizado por usuários do ATP-EMTP em ambientes Windows, sendo disponibilizado gratuitamente através da internet (HOIDALEN, 2016). Em sua versão 6.0, o software conta com uma vasta biblioteca de componentes, que inclui elementos lineares e não lineares, cabos, linhas de transmissão, transformadores, chaves, fontes, máquinas síncronas, máquinas de indução e diversos outros componentes.

O ATPDraw também conta com uma biblioteca especializada para sistemas elétricos de potência (*Power System Toolbox*), contendo modelos de cargas, filtros, relés de proteção, entre outros. Para a visualização de gráficos e pós-processamento dos resultados, o ATPDraw incorpora outros programas como o PlotXY.

O ATPDesigner[®], desenvolvido a partir de 2007, é outro software utilizado como pré-processador gráfico para o ATP-EMTP. No entanto, apenas uma versão “*light*” do programa, com algumas limitações em relação às funções e ao número de elementos, pode ser utilizada sem licença. Diferentemente do ATPDraw que possui uma aplicação generalista, esse software é mais voltado a simulação de sistemas elétricos de potência, integrando recursos para a representação de barramentos, disjuntores, relés de proteção, fusíveis, entre outros.

Além disso, o ATPDesigner é capaz de ler e gravar arquivos no formato COMTRADE de acordo com a norma internacional IEC 60255-24 (Power Engs, 2016). Outra diferenciação deste pré-processador gráfico, diz respeito a disponibilidade de forma integrada, de recursos para a representação de gráficos de corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, fator de deslocamento e métodos para análise de sinais.

4 O SOFTWARE DESENVOLVIDO (ATP-SA)

Neste capítulo, apresenta-se a modelagem e a arquitetura principal do software desenvolvido, o qual recebeu a denominação *Alternative Transients Program – Substation Analysis* (ATP-SA). No processo de análise de requisitos e modelagem do software, utilizou-se um Diagrama de Casos de Uso, no qual os principais casos foram mapeados por meio de Diagramas de Atividades. Já para a descrição de sua arquitetura, optou-se pela utilização de Diagramas de Classes acompanhados de descrição textual.

4.1 DEFINIÇÃO DE RECURSOS E REQUISITOS FUNCIONAIS DO SOFTWARE

Conforme exposto no capítulo 1, o objetivo principal do software desenvolvido é facilitar a simulação e análise de transitórios eletromagnéticos em subestações de potência através do ATP-EMTP, atuando como um pré-processador gráfico para este programa. O ATP-SA fornecerá suporte à modelagem de eventos precursores de transitórios dessa natureza e auxiliará na parametrização da simulação e organização dos resultados.

Para estabelecer os requisitos funcionais do software, foi necessário primeiramente definir quais eventos seriam contemplados. A partir da revisão da literatura apresentada no capítulo 2, onde buscou-se identificar as fontes de transitórios eletromagnéticos mais frequentes e relevantes em subestações, estabeleceu-se as seguintes prioridades de estudo:

- Ocorrência e eliminação de curtos-circuitos;
- Energização de transformadores de potência;
- Manobras de fechamento e abertura de disjuntores;
- Descargas atmosféricas.

Nos estudos de curtos-circuitos, definiu-se que o ATP-SA fornecerá suporte para à simulação de curtos-circuitos trifásicos e monofásicos, com e sem impedância de falta, e à possibilidade de abertura tripolar ou monopolar de disjuntores para isolar a falta. Como suporte à análise de resultados deste estudo, o software proporcionará a mensuração da corrente eficaz verdadeira em quaisquer pontos do sistema devido ao curto-circuito. Além disso, fornecerá a medida das tensões geradas pela abertura de disjuntores para isolar a porção do sistema em curto-circuito.

Com relação a energização de transformadores de potência, estabeleceu-se que será fornecido suporte à simulação de energização individual e solidária destes equipamentos. Para a análise de resultados, o software proporcionará a mensuração do valor eficaz verdadeiro e da composição harmônica da corrente de energização do transformador.

Embora os dois estudos descritos requeiram a operação de disjuntores, devido a sua importância, estes foram tratados separadamente dos demais eventos de manobra. Definiu-se que recursos para simulação de manobras serão oferecidos pelo ATP-SA visando a análise de operações como: energização e desenergização de linhas de transmissão; conexão e desconexão de cargas, reatores e capacitores *shunt* para compensação de reativos; entre outras. As tensões produzidas tanto no fechamento como na abertura dos disjuntores serão mensuradas e disponibilizadas para análise.

Ainda com respeito a transitórios de manobra, definiu-se que o software fornecerá recursos para análise da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) em disjuntores. Embora a TRT não seja um evento em particular, e sim um dos transitórios resultantes na abertura de disjuntores, optou-se por incluí-la nos recursos contemplados pelo ATP-SA em virtude de sua importância para o projeto e análise de superação destes equipamentos.

Por fim, estabeleceu-se também que o software deverá fornecer suporte à simulação de transitórios oriundos de descargas atmosféricas no sistema. Como recursos para análise de resultados, serão medidas as tensões provocadas no sistema devido a ocorrência deste fenômeno.

Para aumentar a gama de aplicações do software pré-processador gráfico desenvolvido, optou-se pela utilização do ATP-EMTP personalizado pelo Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos do Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência (LAPES-CEESP) da UFSM. Este consiste na versão GNU MingW32 do ATP-EMTP, acrescida de ferramentas denominadas *foreign models* que permitem simular os eventos descritos (exceção a TRT) de forma estocástica empregando o Método de Monte Carlo (MMC). O programa foi concebido durante a realização de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), promovido pelo LAPES-CEESP em parceria com a Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT) do Rio Grande do Sul. Maiores detalhes sobre o mesmo podem ser obtidos no Relatório Final do referido Projeto de P&D (LAPES-CEESP, 2016), bem como nos trabalhos publicados por Kräulich et al. (2015) e Marchesan et al. (2015a).

Ressalta-se que o ATP-SA não visa auxiliar a modelagem do sistema elétrico e a criação do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP. Para isso, o usuário pode utilizar outros softwares pré-processadores gráficos citados no capítulo 3, como o ATPDraw (HOIDALEN, 2016), que dispõem de recursos para modelagem e parametrização de diversos equipamentos e componentes. Descrevendo seu funcionamento de forma bastante elementar, o ATP-SA receberá o arquivo contendo o modelo da subestação, incluirá neste as informações necessárias a realização do estudo e executará a simulação no ATP-EMTP personalizado pelo LAPES-CEESP.

Para facilitar o gerenciamento das simulações, definiu-se que o software organizará um banco de dados com as seguintes informações:

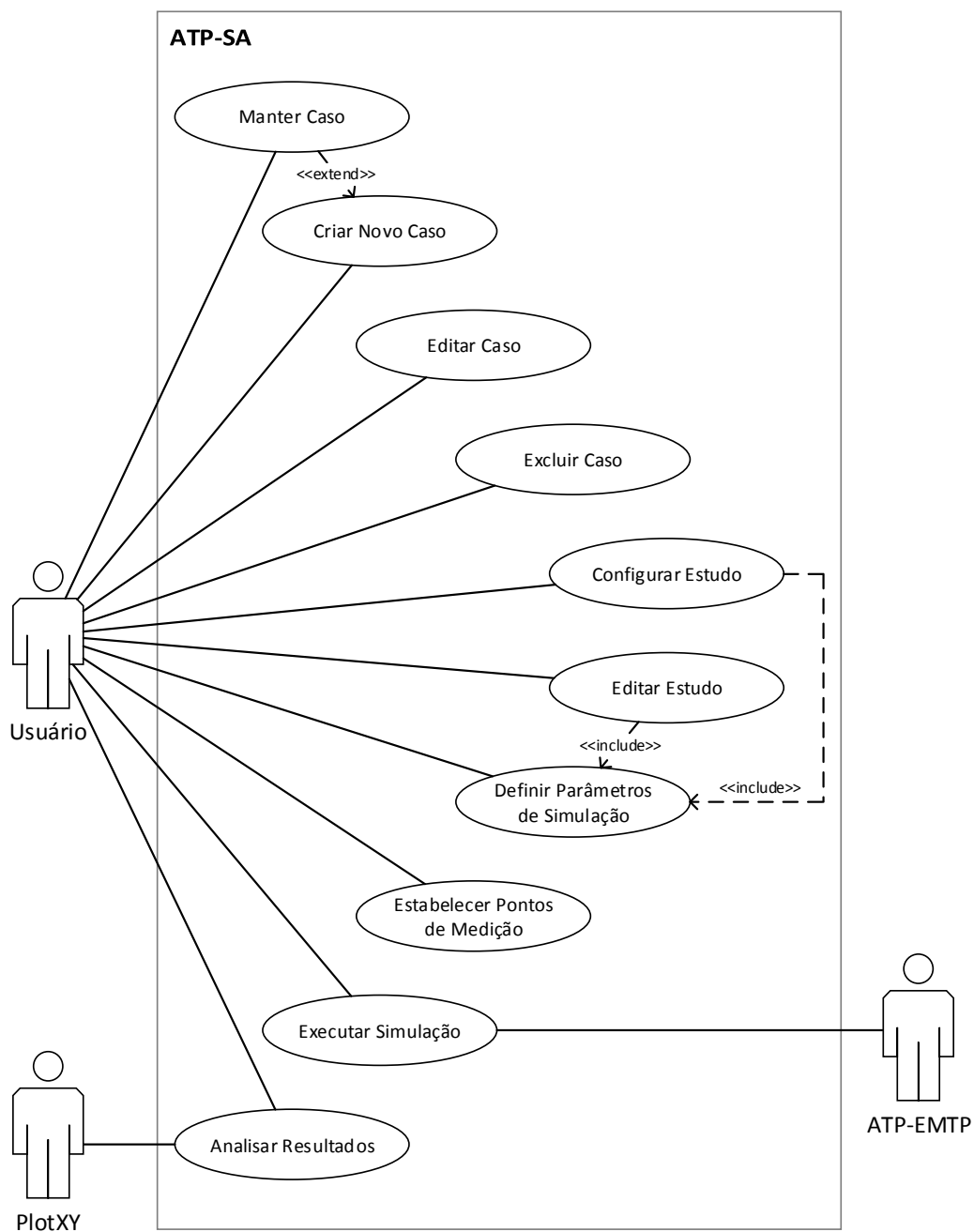
- Nome do autor do estudo;
- Data de realização;
- Nome da subestação analisada;
- Descrição geral da subestação;
- Tipo de estudo realizado: curto-circuito, energização de transformador, TRT em disjuntor, manobra de disjuntor ou descarga atmosférica;
- Procedimento de simulação utilizado: determinístico ou estocástico (com exceção do estudo de TRT);
- Descrição geral do estudo;
- Parâmetros do evento simulado, de acordo com o tipo e o procedimento de estudo;
- Parâmetros da simulação no ATP-EMTP, como passo de integração e tempo total de simulação;
- Pontos de medição de tensão e corrente para análise dos resultados;
- Localização do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP contendo o modelo da subestação analisada.

Uma vez definidos as principais aplicações e recursos oferecidos pelo software desenvolvido, passou-se a análise dos requisitos funcionais do mesmo. Para isso, elaborou-se um Diagrama de Casos de Uso.

4.1.1 Diagrama de Casos de Uso

A Figura 4.1 exibe o Diagrama de Casos de Uso que busca estabelecer de forma geral as funcionalidades do ATP-SA e sua relação com elementos externos (denominados “atores”), como usuários, ferramentas e outros programas utilizados. O termo “caso” utilizado neste e nos demais diagramas apresentados a seguir, refere-se a cada estudo realizado e armazenado no banco de dados do software.

Figura 4.1 – Diagrama de Casos de Uso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com as relações estabelecidas no Diagrama de Casos de Uso, os “atores” que irão interagir com o ATP-SA correspondem a:

- Usuário – Pessoas que utilizarão o software para simular eventos em uma subestação e analisar os transitórios eletromagnéticos produzidos;
- ATP-EMTP – Programa para o qual o software desenvolvido presta a função de pré-processador gráfico e que contém as ferramentas matemáticas e computacionais necessárias à simulação;
- PlotXY – Programa responsável por exibir os resultados da simulação no domínio do tempo através de gráficos cartesianos.

Os Quadros de 4.1 a 4.10 apresentam uma documentação dos Casos de Uso identificados no diagrama da Figura 4.1, buscado caracterizar em linhas gerais suas principais atribuições. Através do campo de “Pré-condições”, pode-se verificar os parâmetros e requisitos funcionais de cada Caso de Uso. Já o campo “Pós-condições”, visa identificar as ações geradas pela execução dos mesmos.

Quadro 4.1 – Documentação do Caso de Uso: Criar Novo Caso.

Caso de Uso	Criar Novo Caso
Atores	Usuário
Descrição	<p>O usuário será capaz de cadastrar novos casos no banco de dados do ATP-SA. Esta ação poderá ser realizada diretamente mediante a inserção de novos dados ou através da herança de informações de um caso já existente. As informações necessárias a criação de um novo caso serão:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Nome da subestação; ○ Descrição geral da subestação; ○ Nome do autor da simulação; ○ Data de realização; ○ Localização do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP contendo o modelo da subestação. <p>Caso o usuário tenha utilizado o ATPDraw para modelar o sistema, poderá endereçar também o arquivo deste programa. Além disso, uma imagem com o diagrama representativo da subestação poderá ser vinculada a cada caso analisado.</p>
Pré-condições	Será necessário que o usuário disponha das informações listadas.
Pós-condições	Novo caso cadastrado no banco de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.2 – Documentação do Caso de Uso: Manter Caso.

Caso de Uso	Manter Caso
Atores	Usuário
Descrição	A ação de manter caso será executada sempre que o usuário optar pela criação de um novo caso a partir de outro já cadastrado no banco de dados. Esta função se mostra importante por facilitar uma nova simulação do mesmo tipo de estudo a partir das informações de outra realizada anteriormente, sem que os dados desta sejam perdidos.
Pré-condições	Possuir um caso do mesmo tipo de estudo já cadastrado no banco de dados.
Pós-condições	Os dados do caso herdado serão mantidos inalterados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.3 – Documentação do Caso de Uso: Editar Caso.

Caso de Uso	Editar Caso
Atores	Usuário
Descrição	O usuário será capaz de editar os dados de casos já cadastrados no banco de dados do ATP-SA. Todas as informações listadas no Caso de Uso Criar Novo Caso poderão ser editadas, com exceção dos arquivos vinculados. Esta restrição visa reduzir a probabilidade da ocorrência de erros na simulação.
Pré-condições	Selecionar no banco de dados o caso que deseja editar.
Pós-condições	Caso atualizado com as novas informações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.4 – Documentação do Caso de Uso: Excluir Caso.

Caso de Uso	Excluir Caso
Atores	Usuário
Descrição	O usuário será capaz de excluir casos do banco de dados.
Pré-condições	Selecionar o caso que deseja excluir.
Pós-condições	Caso excluído do banco de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.5 – Documentação do Caso de Uso: Configurar Estudo.

Caso de Uso	Configurar Estudo
Atores	Usuário
Descrição	Para cada caso do banco de dados, o usuário poderá selecionar e configurar um dos seguintes tipos de estudo: <ul style="list-style-type: none"> ○ Curto-circuito; ○ Energização de transformador; ○ TRT em disjuntor; ○ Manobra de disjuntor; ○ Descarga atmosférica. Os dados a serem informados dependerão do tipo de estudo e do procedimento (determinístico ou estocástico) de simulação selecionados.
Pré-condições	Selecionar um caso no banco de dados cujo estudo ainda não tenha sido configurado.
Pós-condições	Estudo configurado. Após esta ação, o software predefinirá automaticamente parâmetros da simulação de acordo com o tipo e o procedimento de estudo selecionados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.6 – Documentação do Caso de Uso: Editar Estudo.

Caso de Uso	Editar Estudo
Atores	Usuário
Descrição	Uma vez que o estudo realizado em um determinado caso tenha sido configurado, seus dados poderão ser editados pelo usuário. No entanto, não será permitido alterar o tipo de estudo e o procedimento de simulação, visto que os parâmetros de configuração são específicos para cada análise.
Pré-condições	Selecionar um caso no banco de dados cujo estudo já tenha sido configurado.
Pós-condições	Estudo atualizado com as novas informações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.7 – Documentação do Caso de Uso: Estabelecer Pontos de Medição.

Caso de Uso	Estabelecer Pontos de Medição
Atores	Usuário
Descrição	Através do ATP-SA, o usuário poderá estabelecer pontos (“nós”) de medição de tensão e corrente no caso analisado. Por questões funcionais do ATP-EMTP, será obrigatório que ao menos um ponto de medição seja informado para que a simulação seja realizada.
Pré-condições	Selecionar um caso no banco de dados cujo estudo já tenha sido configurado.
Pós-condições	Ponto(s) de medição de tensão e/ou corrente estabelecidos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.8 – Documentação do Caso de Uso: Definir Parâmetros de Simulação.

Caso de Uso	Definir Parâmetros de Simulação
Atores	Usuário
Descrição	<p>Após a configuração do estudo realizado em um determinado caso, o ATP-SA indicará alguns parâmetros de simulação compatíveis com o tipo e o procedimento de simulação selecionados:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ dT – Passo de integração utilizado na solução numérica da simulação; ◦ $Tmax$ – Tempo total de simulação. <p>No entanto, o usuário poderá alterá-los a seu critério. Outros parâmetros de simulação que poderão ser definidos pelo usuário dizem respeito a:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ $Xopt$ – Indica se indutores serão parametrizados através de sua indutância (em mH) ou reatância indutiva (em Ω); ◦ $Copt$ – Indica se capacitores serão parametrizados através de sua capacitância (em μF) ou susceptância capacitiva (em μS); ◦ $Freq$ – Define a frequência nominal do sistema em regime permanente.
Pré-condições	Selecionar um caso no banco de dados cujo estudo já tenha sido configurado.
Pós-condições	Parâmetros de simulação definidos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.9 – Documentação do Caso de Uso: Executar Simulação.

Caso de Uso	Executar Simulação
Atores	Usuário e ATP-EMTP
Descrição	Após a configuração do estudo e a definição do(s) ponto(s) de medição de um determinado caso, o usuário poderá executar sua simulação. Para isso, o software utilizará o ATP-EMTP personalizado pelo LAPES-CEESP.
Pré-condições	Selecionar um caso no banco de dados cujo estudo e ponto(s) de medição já tenham sido estabelecidos.
Pós-condições	Geração de arquivos de resultados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.10 – Documentação do Caso de Uso: Analisar Resultados.

Caso de Uso	Analisar Resultados
Atores	Usuário e PlotXY
Descrição	<p>Após executar a simulação de um determinado caso, o usuário poderá analisar seus resultados utilizando os seguintes recursos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Gráficos cartesianos gerados com utilização do software PlotXY – Estes gráficos poderão exibir o comportamento das variáveis monitoradas no domínio do tempo; ○ Histogramas de frequências (para simulações estocásticas) – Estes gráficos poderão exibir o comportamento estatístico das variáveis monitoradas; ○ Gráficos de análise harmônica (para estudos de magnetização de transformador) – Estes gráficos poderão exibir o conteúdo harmônico das variáveis monitoradas.
Pré-condições	Selecionar um caso no banco de dados cuja simulação já tenha sido executada.
Pós-condições	–

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Diagramas de Atividades

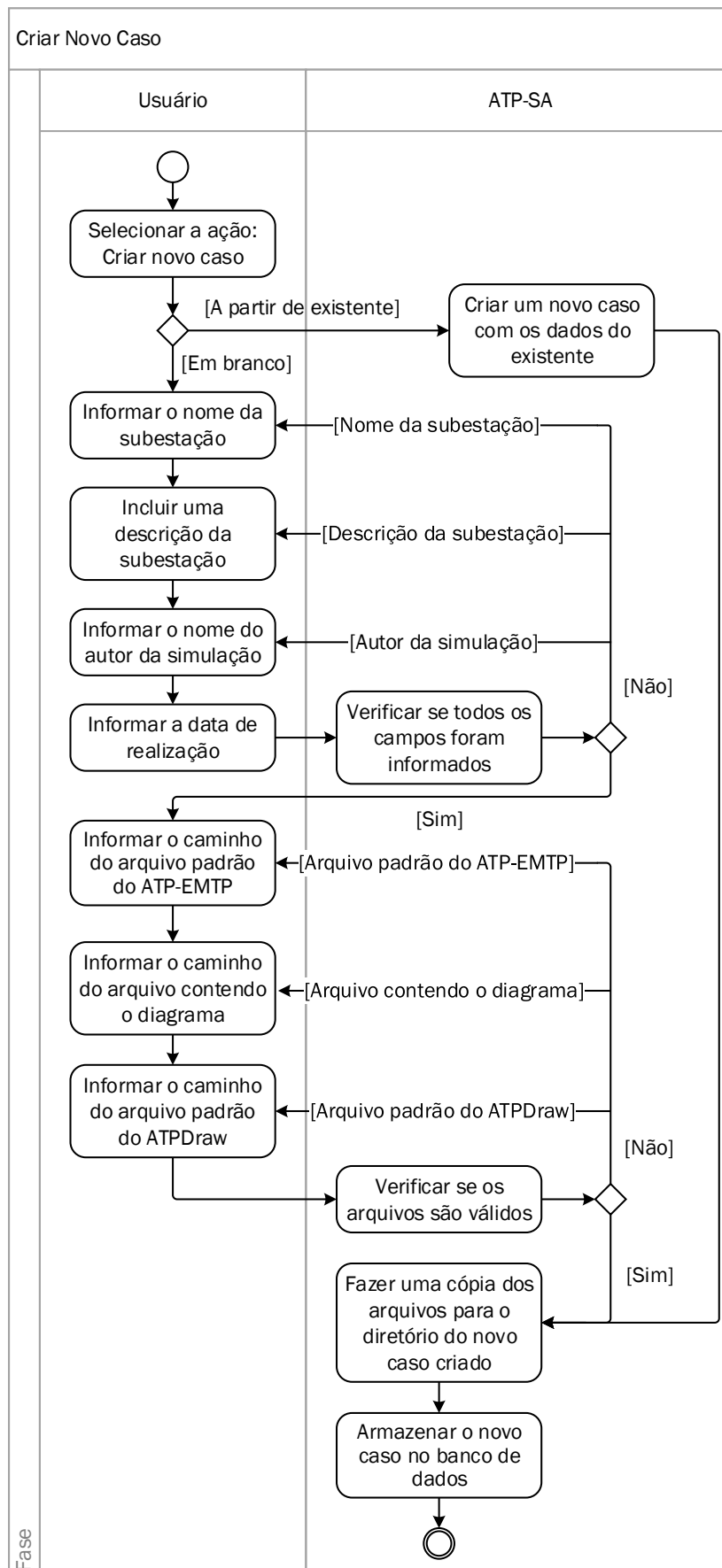
Visando obter um maior detalhamento dos requisitos funcionais do software desenvolvido, os principais Casos de Uso identificados na subseção 4.1.1 foram mapeados através de Diagramas de Atividades. Nestes diagramas, adicionou-se raias de partição (“*swim lanes*”) para facilitar a visualização das atividades realizadas pelos atores e pelo ATP-SA. As figuras de 4.2 a 4.9 apresentam os Diagramas de Atividades elaborados. A descrição do Caso de Uso “Manter Caso” teve seu detalhamento englobado por “Criar Novo Caso”, do qual é estendido (“*extend*”).

A Figura 4.2 exibe o Diagrama de Atividade “Criar Novo Caso” que ilustra o fluxo de ações a serem executadas pelo usuário e pelo ATP-SA para a criação de um novo caso. A primeira ação deverá ser realizada pelo usuário, definindo se o novo caso será criado através da inserção direta de novas informações (caso “em branco”) ou herdando os dados de um caso já cadastrado no banco de dados. Se a opção selecionada for a criação de um novo caso “em branco”, o usuário deverá inserir as informações listadas nas pré-condições do Caso de Uso “Criar Novo Caso” (Quadro 4.1): nome da subestação, descrição geral da subestação, nome do autor da simulação e data de realização.

O ATP-SA verificará se todos os dados foram informados e, na sequência, solicitará ao usuário a localização (caminho) do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP contendo o modelo da subestação analisada. Além deste arquivo, cuja vinculação é obrigatória, o usuário poderá também endereçar o arquivo padrão do ATPDraw, caso tenha utilizado este software para modelar a subestação, e uma imagem do diagrama representativo da mesma. O ATP-SA então verificará a validade dos arquivos informados através de suas extensões e armazenará os dados do novo caso em seu banco de dados.

Se a opção selecionada pelo usuário for a criação de um novo caso a partir de outro existente, o software criará automaticamente um novo caso em seu banco de dados com uma cópia de todas as informações e arquivos do caso selecionado. Nas duas situações, para melhor organização dos arquivos, um diretório particular será criado para cada novo caso cadastrado.

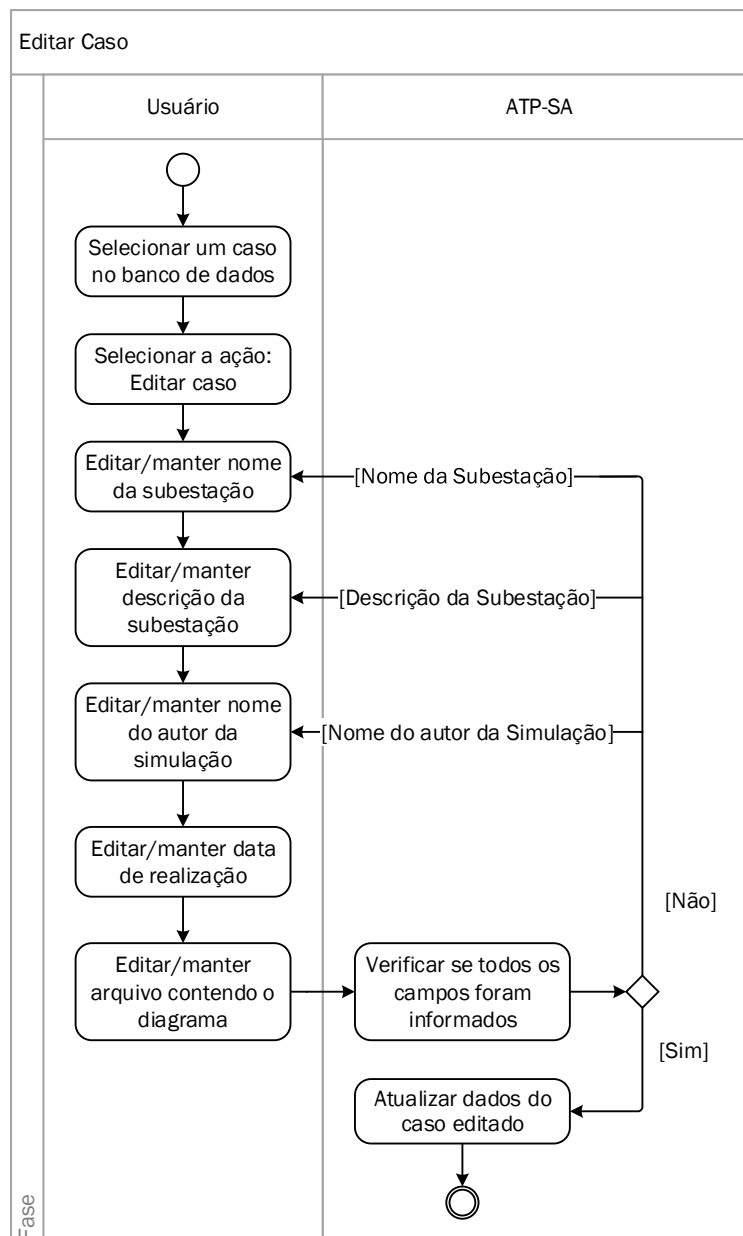
Figura 4.2 – Diagrama de Atividade: Criar Novo Caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na descrição do Caso de Uso “Editar Caso” (Quadro 4.3), o usuário poderá editar dados de casos já cadastrados. Para isso, deverá selecionar no banco de dados do ATP-SA o caso que deseja editar. O software carregará os dados armazenados para que o usuário opte por editá-los ou mante-los, verificando novamente se nenhuma informação foi suprimida. O Diagrama de Atividade da Figura 4.3 apresenta o fluxo de ações descritas. Verifica-se que não será permitido alterar o arquivo padrão do ATP-EMTP (e do ATPDraw), pois como a edição poderá ser realizada após a configuração do estudo, parâmetros que foram definidos em função deste arquivo poderão não ser mais consistentes, acarretando erro na simulação do caso.

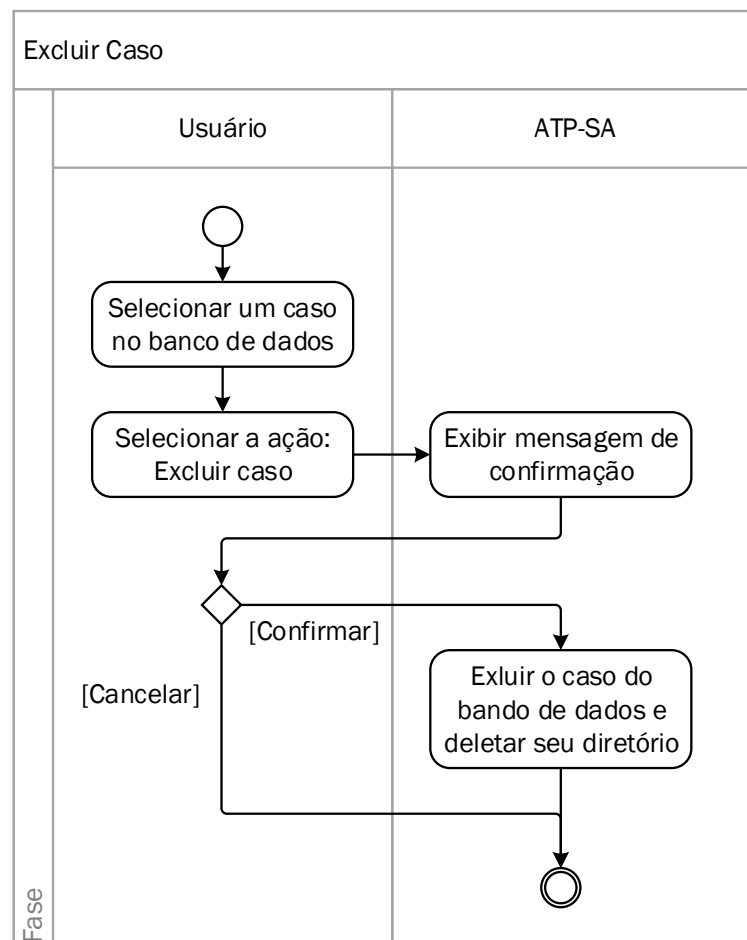
Figura 4.3 – Diagrama de Atividade: Editar Caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para excluir um caso cadastrado no banco de dados, o usuário precisará selecioná-lo e executar a ação de exclusão através da interface gráfica do ATP-SA. Visando minimizar a ocorrência de exclusões acidentais, uma mensagem de confirmação com padrão de resposta negativo (“Não”) será exibida pelo software antes de efetuar a ação. A exclusão efetiva do caso selecionado consistirá em deletar suas informações e seu diretório de arquivos do banco de dados do ATP-SA. O Diagrama de Atividade apresentado na Figura 4.4 demonstra a sequência de ações a serem realizadas pelo usuário e pelo software.

Figura 4.4 – Diagrama de Atividade: Excluir Caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os casos cadastros no banco de dados através da opção “Criar Novo Caso em branco”, o usuário deverá configurar o estudo a ser realizado para posteriormente executar sua simulação. Nesta ação, a primeira atividade a ser realizada será a definição do tipo de estudo. Conforme identificado na descrição do Caso de Uso “Configurar Estudo” (Quadro 4.5), os tipos de estudos contemplados pelo ATP-SA são:

- Curto-circuito;
- Energização de transformador;
- TRT em disjuntor;
- Manobra de disjuntor;
- Descarga atmosférica.

Juntamente com o tipo de estudo, o usuário deverá informar se o procedimento de simulação empregado será determinístico ou estocástico. Para a análise da TRT em disjuntor, no entanto, só será possível optar pelo procedimento determinístico, visto que o ATP-EMTP personalizado pelo LAPES-CEESP não comporta a simulação estocástica deste tipo de estudo. Além destas definições, uma descrição geral do estudo realizado também poderá ser adicionada.

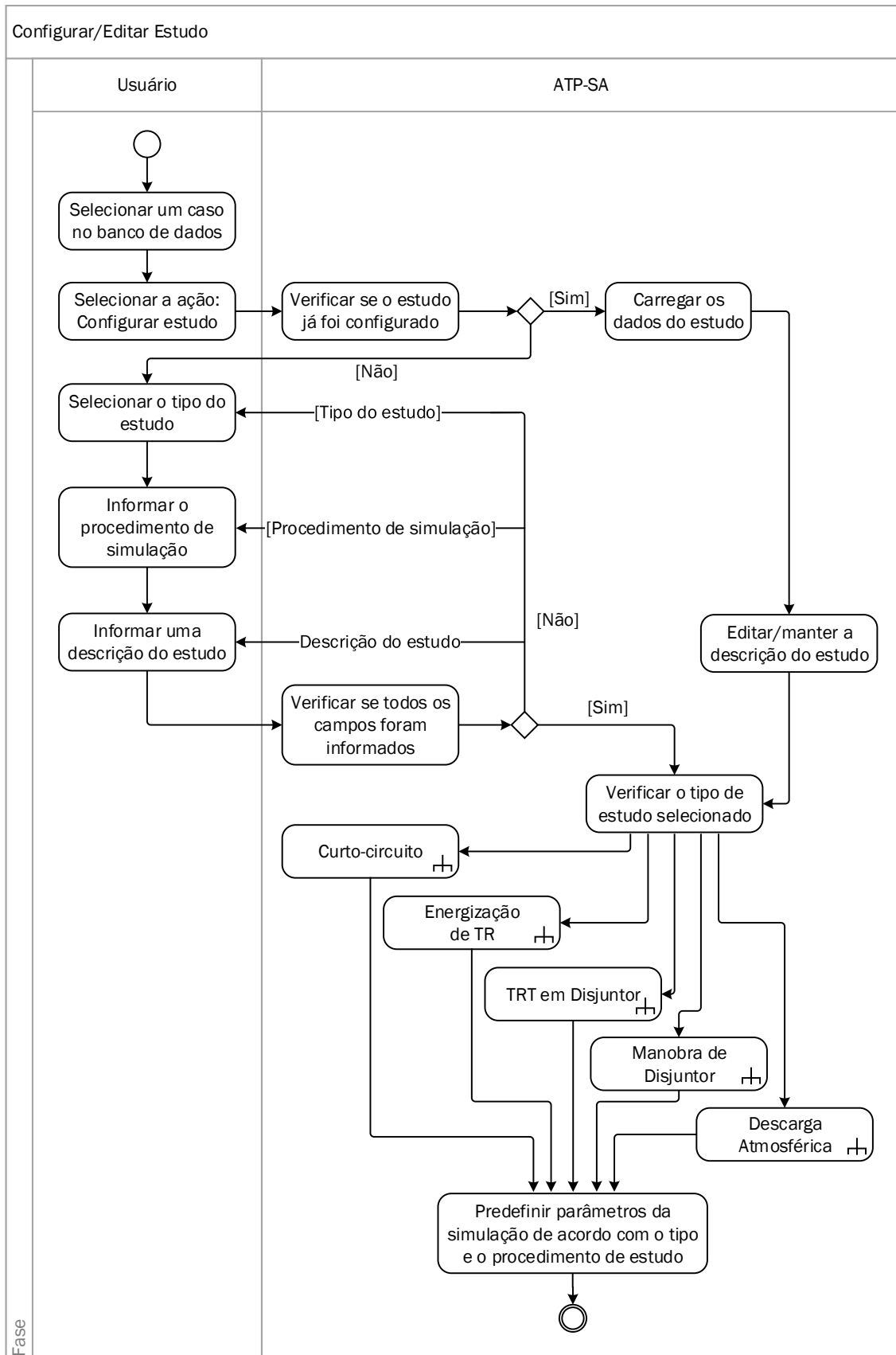
Na ocasião em que um novo caso for criado a partir de outro já existente, estas definições serão herdadas automaticamente com os demais dados do estudo selecionado. Após criado o novo caso, a descrição e os dados específicos do estudo poderão ser editados pelo usuário. Os parâmetros de cada tipo de estudo e procedimento de simulação serão detalhados posteriormente nesta seção.

A Figura 4.5 demonstra o Diagrama de Atividade que sintetiza as ações necessárias para configurar ou editar o estudo realizado em um determinado caso. Devido a similaridade funcional, este diagrama foi utilizado para descrever juntamente os Casos de Uso “Configurar Estudo” e “Editar Estudo”. Como se pode observar, o software verificará se os parâmetros do estudo já foram configurados, carregando seus dados para edição em caso afirmativo.

No entanto, uma vez definidos o tipo de estudo e o procedimento de simulação, não será permitida sua alteração através do comando de edição. Esta ação acarretaria na mudança dos parâmetros necessários a configuração do estudo, tornando os dados armazenados incoerentes. Por exemplo, os parâmetros que caracterizam um evento de curto-circuito são diferentes dos que modelam uma descargas atmosféricas. Assim, para simular um tipo de estudo diferente o usuário precisará primeiramente criar um novo caso “em branco”.

Conforme indicado no diagrama da Figura 4.5, o ATP-SA verificará o tipo de estudo selecionado e direcionará o usuário para a configuração (ou edição) de seus parâmetros específicos. Por questões de espaço, as subatividades que descrevem a parametrização/edição de cada tipo de estudo assinalado no diagrama são apresentadas no Apêndice A.

Figura 4.5 – Diagrama de Atividade: Configurar/Editar Estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme definido no início desta seção, em estudos de curto-circuito, o ATP-SA fornecerá suporte para a simulação de curtos-circuitos trifásicos e monofásicos, com e sem impedância de falta, e à possibilidade de abertura tripolar ou monopolar de disjuntores para isolar a falta. Para configurar a simulação de um estudos como este através do ATP-SA, o usuário precisará informar o conjunto de parâmetros listados no Quadro 4.11. Conforme modelado no Diagrama de Atividade apresentado na Figura A.2, o software solicitará informações conforme o procedimento de simulação selecionando e realizará verificações para constatar se todos os dados obrigatórios foram fornecidos.

Quadro 4.11 – Parâmetros para a configuração do estudo de curto-circuito.

Parâmetros comuns a simulação determinística e estocástica	
Tipo de curto-circuito: trifásico ou monofásico (valor padrão: trifásico).	
Impedância de falta (valor padrão: 0 Ω).	
Ponto (“nó”) do sistema onde o curto-circuito será simulado.	
Número (identificação) do disjuntor da subestação que realizará a abertura após o curto-circuito.	
Tipo de abertura do disjuntor: tripolar ou monopolar (valor padrão: tripolar).	
Pontos (“nós”) do sistema onde o disjuntor estará situado.	
Tempo para a abertura do disjuntor após o curto-circuito (valor padrão: 100 ms).	
Parâmetros específicos da simulação determinística	Parâmetros específicos da simulação estocástica
Instante de ocorrência do curto-circuito (valor padrão: 100 ms).	Valor inicial (“semente”) para a geração da sequência aleatória utilizada no MMC (valor padrão: 97).
Instante de religamento do disjuntor (valor padrão: sem religamento).	Número total de curtos-circuitos simulados (valor padrão: 100).
	Tempo de dispersão entre polos do disjuntor na abertura tripolar (valor padrão: 5 ms).
	Ponto do sistema para a medição de tensão e corrente (variáveis monitoradas na análise).
	Tensão base do sistema no ponto monitorado.
	Potência base do sistema (valor padrão: 100 MVA).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como se pode verificar no Quadro 4.11, no procedimento de simulação determinístico, o usuário poderá definir os instantes de ocorrência do curto-circuito, de abertura e de religamento do disjuntor. Já no procedimento estocástico, o instante de ocorrência do curto-circuito será definido através do MMC. Neste tipo de simulação, embora o usuário também possa definir o instante do comando de abertura do disjuntor, uma dispersão entre polos também poderá ser considerada.

Para auxiliar o usuário na definição de alguns parâmetros do estudo de curto-circuito, bem como dos demais tipos de estudo abordados a seguir, o ATP-SA fornecerá valores padrão (*default*) indicados pela literatura consultada no capítulo 2, ou constatados pelo autor durante a realização do presente trabalho.

Em estudos de energização de transformador no ATP-SA, os parâmetros indicados no Quadro 4.12 deverão ser informados pelo usuário. No Diagrama de Atividade da Figura A.3, pode-se analisar a sequência de ações que deverão ser realizadas pelo usuário e pelo software para a configuração deste tipo de estudo. Após conferir a inserção de parâmetros comuns a simulação determinística e estocástica, o ATP-SA verificará o procedimento de estudo empregado e solicitará ao usuário a informação dos demais parâmetros necessários.

Um dos parâmetros listados no Quadro 4.12 é o tempo para início da análise após a energização do transformador. Esta análise corresponde a determinação do valor eficaz verdadeiro e da composição harmônica da corrente de energização, calculados em um ciclo da frequência fundamental do sistema a partir do tempo definido neste parâmetro.

Nas simulações determinísticas de energização de transformador, o usuário poderá definir o instante exato de fechamento do disjuntor. Nas simulações estocásticas, no entanto, este instante será definido através do MMC. A dispersão entre polos no fechamento do disjuntor também poderá ser considerada nestas simulações.

Em estudos de TRT, o ATP-SA fornecerá suporte para a simulação de abertura do disjuntor analisado após a ocorrência de um curto-circuito em qualquer ponto do sistema. As ações necessárias à configuração deste tipo de estudo são mapeadas no Diagrama de Atividade da Figura A.1. Conforme justificado anteriormente, para análise de TRT em disjuntor o ATP-SA comportará apenas simulações de cunho determinístico, cujos parâmetros de configuração são listados no Quadro 4.13.

Quadro 4.12 – Parâmetros para a configuração do estudo de energização de transformador.

Parâmetros comuns a simulação determinística e estocástica	
Número (identificação) do disjuntor da subestação que efetuará a energização.	
Pontos (“nós”) do sistema onde o disjuntor estará situado.	
Tensão base do sistema.	
Potência base do sistema (valor padrão: 100 MVA).	
Frequência do sistema em regime permanente (valor padrão: 60 Hz).	
Tempo para início da análise após o fechamento do disjuntor para a energização do transformador (valor padrão: 0 s).	
Parâmetros específicos da simulação determinística	Parâmetros específicos da simulação estocástica
Instante de fechamento do disjuntor para energização do transformador (valor padrão: 100 ms).	Valor inicial (“semente”) para a geração da sequência aleatória utilizada no MMC (valor padrão: 97).
	Número total de energizações simuladas (valor padrão: 100).
	Tempo de dispersão entre polos do disjuntor no fechamento tripolar (valor padrão: 5 ms).
	Ponto do sistema para a medição de corrente (variável monitorada na análise).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.13 – Parâmetros para a configuração do estudo de TRT em disjuntor.

Parâmetros da simulação determinística
Tipo de curto-circuito: trifásico ou monofásico (valor padrão: trifásico).
Ponto (“nó”) do sistema onde o curto-circuito será simulado.
Instante em que o curto-circuito será realizado (padrão: 0 s).
Número (identificação) do disjuntor da subestação em que a TRT será analisada.
Tipo de abertura do disjuntor: tripolar ou monopolar (valor padrão: tripolar).
Pontos (“nós”) do sistema onde o disjuntor estará situado.
Tempo para abertura do disjuntor após a ocorrência do curto-circuito (padrão: 100 ms).
Tensão nominal do sistema no ponto de instalação do disjuntor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tensão nominal do sistema, relacionada no Quadro 4.13 entre os parâmetros de configuração do estudo de TRT, será utilizada pelo ATP-SA na seleção de valores típicos para modelagem do disjuntor, como capacitâncias para terra e entre contatos. Este procedimento realizado pelo software será descrito em detalhes na seção 4.2.

Além das simulações de curto-circuito, energização de transformador e TRT, o ATP-SA permitirá que outros transitórios de manobra sejam analisados através da opção “Manobra de Disjuntor”. O Quadro 4.14 apresenta os parâmetros a serem informados neste tipo de estudo.

Quadro 4.14 – Parâmetros para a configuração do estudo de manobra de disjuntor.

Parâmetros comuns a simulação determinística e estocástica	
Número (identificação) do disjuntor da subestação em que as manobras serão realizadas.	
Pontos (“nós”) do sistema onde o disjuntor estará situado.	
Tipo de operação do disjuntor: tripolar ou monopolar (valor padrão: tripolar).	
Parâmetros específicos da simulação determinística	Parâmetros específicos da simulação estocástica
Estado inicial do disjuntor: fechado ou aberto (valor padrão: fechado).	Valor inicial (“semente”) para a geração da sequência aleatória utilizada no MMC (valor padrão: 97).
Tempos de operação (valores padrão: 1ª operação = 100 ms (abertura); 2ª operação = 200 ms (fechamento); 3ª operação = 300 ms (abertura); 4ª operação = 400 ms (fechamento)).	Número total de manobras simuladas (valor padrão: 100).
	Tempo de dispersão entre polos do disjuntor na operação tripolar (valor padrão: 5 ms).
	Ponto do sistema para a medição de tensão (variável monitorada na análise).
	Tensão base do sistema no ponto monitorado.
	Potência base do sistema (valor padrão: 100 MVA).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas simulações determinísticas de manobras de disjuntor, o usuário poderá definir até quatro tempos de operação diferentes (duas aberturas e dois fechamentos, intercalados), sendo obrigatório a definição de ao menos uma operação. A escolha do estado inicial do disjuntor definirá automaticamente as operações subsequentes. Já em simulações estocásticas, os tempos

de operação do disjuntor serão definidos através do MMC, podendo também considerar a dispersão entre polos. As operações de abertura e fechamento serão realizadas intercaladamente de acordo com o número total de manobras simuladas, sendo a primeira operação uma abertura. A Figura A.4 exibe o Diagrama de Atividade para a configuração deste tipo de estudo.

Nos estudos de descargas atmosféricas, os parâmetros a serem configurados pelo usuário são listados no Quadro 4.15. O Diagrama de Atividade da Figura A.5 relaciona as ações para definição destes parâmetros.

Quadro 4.15 – Parâmetros para a configuração do estudo de descarga atmosférica.

Parâmetros comuns a simulação determinística e estocástica	
Ponto (“nó”) do sistema onde ocorrerá a incidência da descarga atmosférica.	
Impedância de surto do sistema (valor padrão: 300 Ω).	
Forma de onda para representação da descarga atmosférica (valor padrão: Heidler).	
Parâmetros específicos da simulação determinística	Parâmetros específicos da simulação estocástica
Valor de pico (máximo) da corrente de descarga (valor padrão: 31,1 kA).	Valor de pico (máximo) da corrente de descarga: mediana (valor padrão: 31,1 kA) e desvio padrão (valor padrão: 0,484 kA).
Tempo de frente da corrente de descarga (valor padrão: 3,83 μ s).	Tempo de frente da corrente de descarga: mediana (valor padrão: 3,83 μ s) e desvio padrão (valor padrão: 0,553 μ s).
Tempo de cauda da corrente de descarga (valor padrão: 77,5 μ s).	Tempo de cauda da corrente de descarga: mediana (valor padrão: 77,5 μ s) e desvio padrão (valor padrão: 0,557 μ s).
Instante de ocorrência da descarga atmosférica (valor padrão: 1 ms).	Valor inicial (“semente”) para a geração da sequência aleatória utilizada no MMC (valor padrão: 97).
	Número total de descargas atmosféricas simuladas (valor padrão: 100).
	Ponto do sistema para a medição de tensão (variável monitorada na análise).
	Tensão base do sistema no ponto monitorado.
	Potência base do sistema (valor padrão: 100 MVA).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas simulações determinísticas de descargas atmosféricas no ATP-SA, o usuário poderá definir diretamente os parâmetros da forma de onda de corrente (corrente de pico, tempo de frente e tempo de cauda). Já nas simulações estocásticas, estes parâmetros serão definidos através do MMC com base nos parâmetros estatísticos informados. Procedimento semelhante será realizado com o instante de ocorrência das descargas atmosféricas nestas simulações.

Conforme representado anteriormente no Diagrama de Atividade da Figura 4.5, após a configuração do estudo a ser realizado em determinado caso, o ATP-SA predefinirá automaticamente alguns parâmetros de simulação. Estes parâmetros, listados no Quadro 4.8, correspondem ao passo de integração (dT) e ao tempo total de simulação (T_{max}).

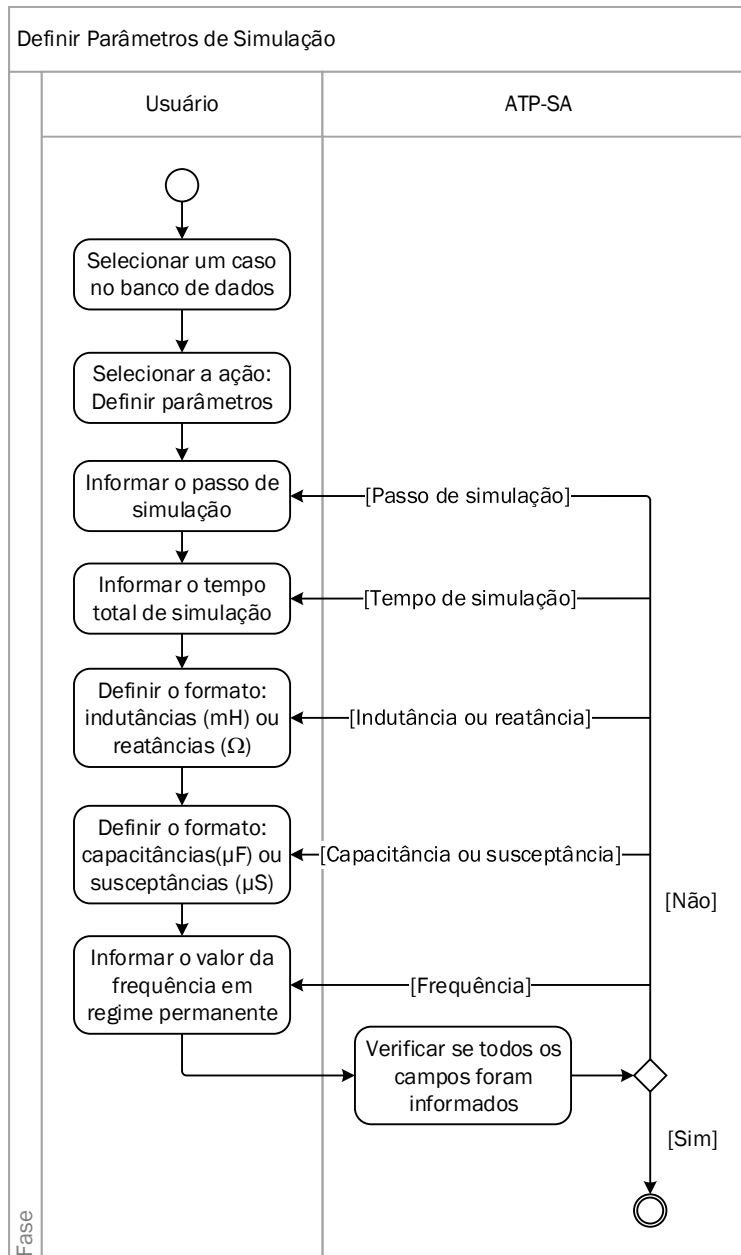
O pré-processador gráfico ATPDraw, em sua versão 6.0, também realiza ação semelhante. No entanto, como este software possui aplicação genérica, os valores predefinidos por ele são os mesmos para qualquer tipo de estudo realizado: $dT = 1 \mu s$; $T_{max} = 1 ms$. Já o ATP-SA indicará valores com base no tipo de estudo e no procedimento de simulação selecionados pelo usuário. Estes valores serão apresentados na seção 4.2.

Embora o ATP-SA indique valores para os parâmetros de simulação, o usuário poderá modificá-los a seu critério. O Diagrama de Atividade da Figura 4.6 apresenta as ações a serem realizadas para a configuração destes parâmetros pelo usuário e a verificação efetuada pelo software.

Antes de realizar a simulação do estudo configurado em determinado caso, o usuário precisará definir pontos de medição de tensão e/ou corrente. Estas serão as variáveis elétricas exportadas pelo ATP-EMTP no arquivo de resultados para posterior análise, sendo um pré-requisito para que a simulação seja executada.

Diferentemente dos parâmetros de simulação, os pontos de medição não serão predefinidos pelo ATP-SA, pois são dependentes do “nome” dos “nós” do sistema cadastrados no arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP. No entanto, o software listará os pontos de medição já existentes neste arquivo, para que o usuário selecione-os conforme seu interesse. Além disso, permitirá que novos pontos de medição sejam definidos diretamente de sua interfase gráfica.

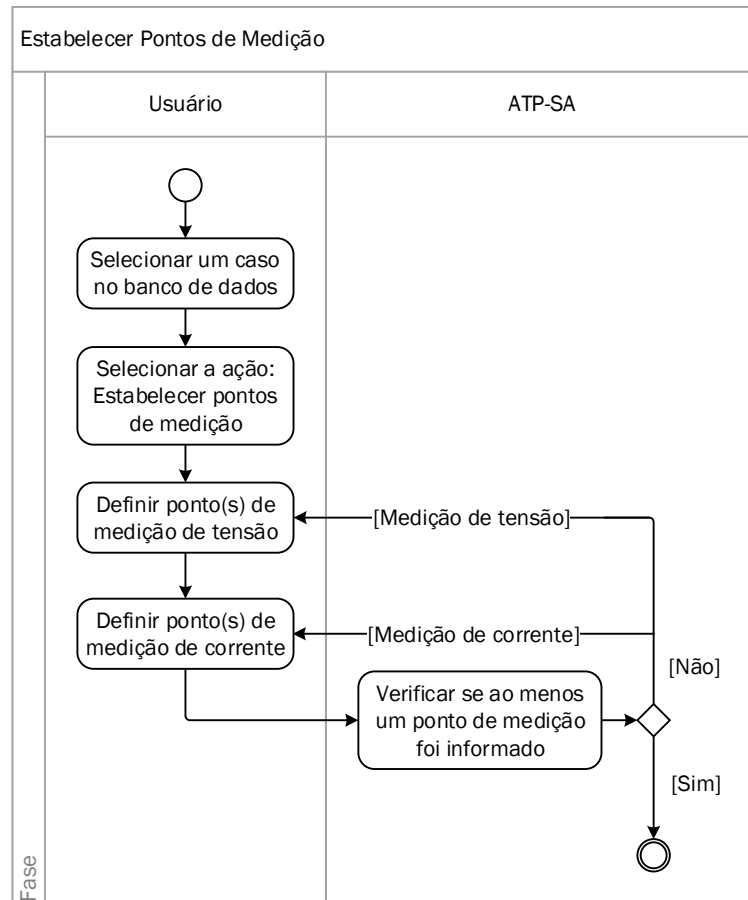
Figura 4.6 – Diagrama de Atividade: Definir Parâmetros de Simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a descrição do Caso de Uso “Estabelecer Pontos de Medição” (Quadro 4.7), devido a concepção funcional do ATP-EMTP, ao menos um ponto de medição deve ser estabelecido no arquivo de entrada para que a simulação seja realizada. Em vista disso, quando o usuário executar a configuração dos pontos de medição, o software verificará se esta condição foi satisfeita. O procedimento descrito é esquematizado no Diagrama de Atividade da Figura 4.7.

Figura 4.7 – Diagrama de Atividade: Estabelecer Pontos de Medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

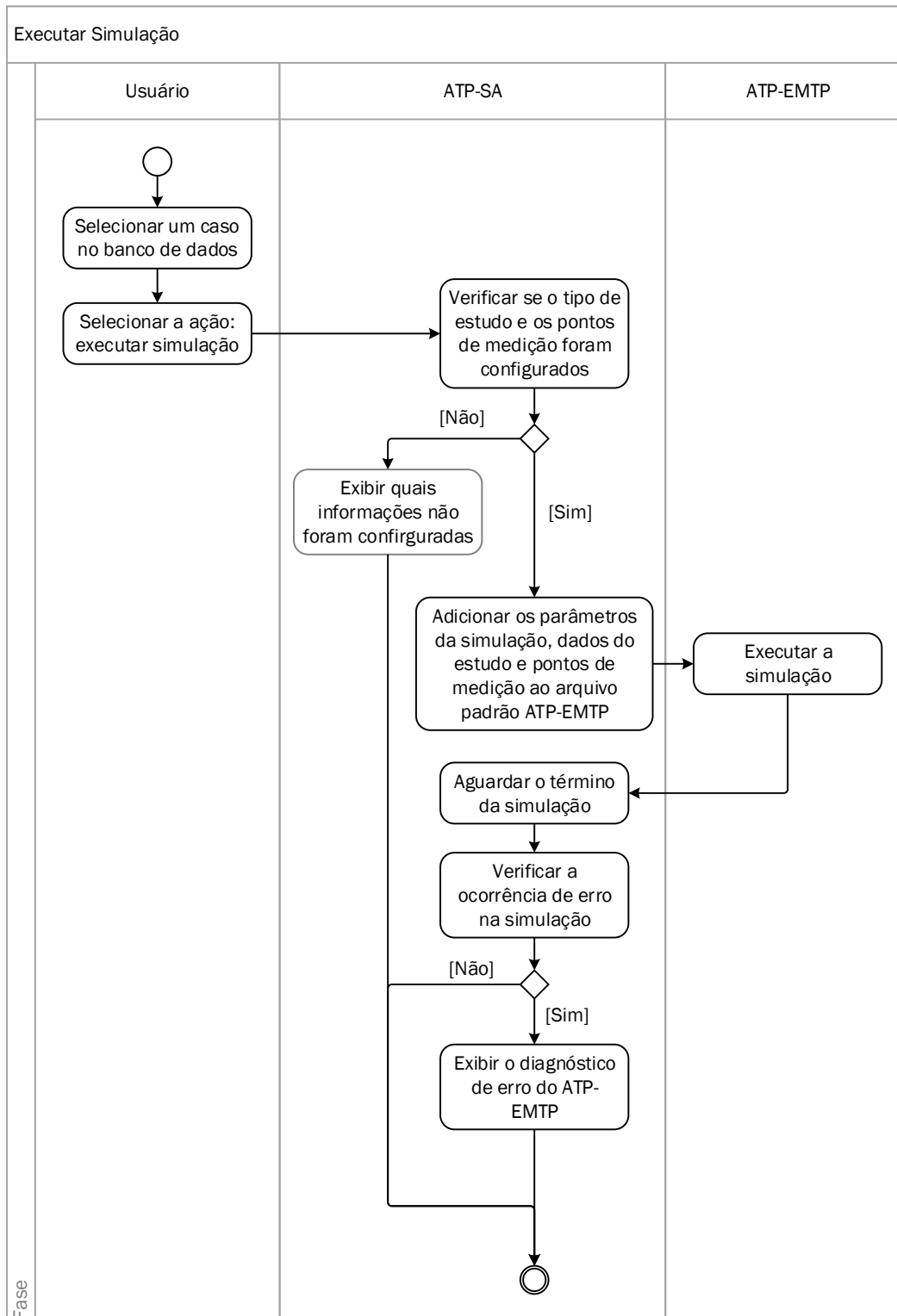
A Figura 4.8 apresenta o Diagrama de Atividade “Executar Simulação”. Para realizar esta ação, primeiramente o usuário deverá selecionar no banco de dados o caso que deseja simular. Na sequência, o ATP-SA verificará se tipo de estudo e o(s) ponto(s) de medição do caso selecionado já foram definidos. Em caso negativo, exibirá uma mensagem solicitando as informações faltantes. Já em caso afirmativo, o software adicionará os parâmetros do estudo, os parâmetros de simulação e o(s) ponto(s) de medição configurados pelo usuário ao arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP, vinculado anteriormente na criação do novo caso.

Posteriormente a edição do arquivo, o software efetuará a simulação do caso através do ATP-EMTP. Ao seu término, o ATP-SA verificará a ocorrência de erros na simulação através da inspeção do arquivo de saída do ATP-EMTP (com extensão .lis). Se algum erro for encontrado, uma mensagem com o diagnóstico informado pelo ATP-EMTP será exibida para o usuário.

Embora as últimas versões do ATP-EMTP GNU MingW32 suportem a execução simultânea de várias simulações, os *foreign models* adicionados a versão personalizada pelo

LAPES-CEESP não foram desenvolvidos com esta capacidade. Em vista disso, o ATP-SA verificará se algum caso está sendo simulado e bloqueará esta ação. Este procedimento não foi modelado no Diagrama de Atividade da Figura 4.8.

Figura 4.8 – Diagrama de Atividade: Executar Simulação.



Após executar a simulação de determinado caso, o usuário poderá analisar seus resultados. Para auxiliar esta atividade, o ATP-SA intermediará a utilização do software PlotXY, que permite a geração de gráficos cartesianos bidimensionais. Estes gráficos poderão exibir o comportamento, no domínio do tempo, das variáveis selecionadas através dos pontos de medição.

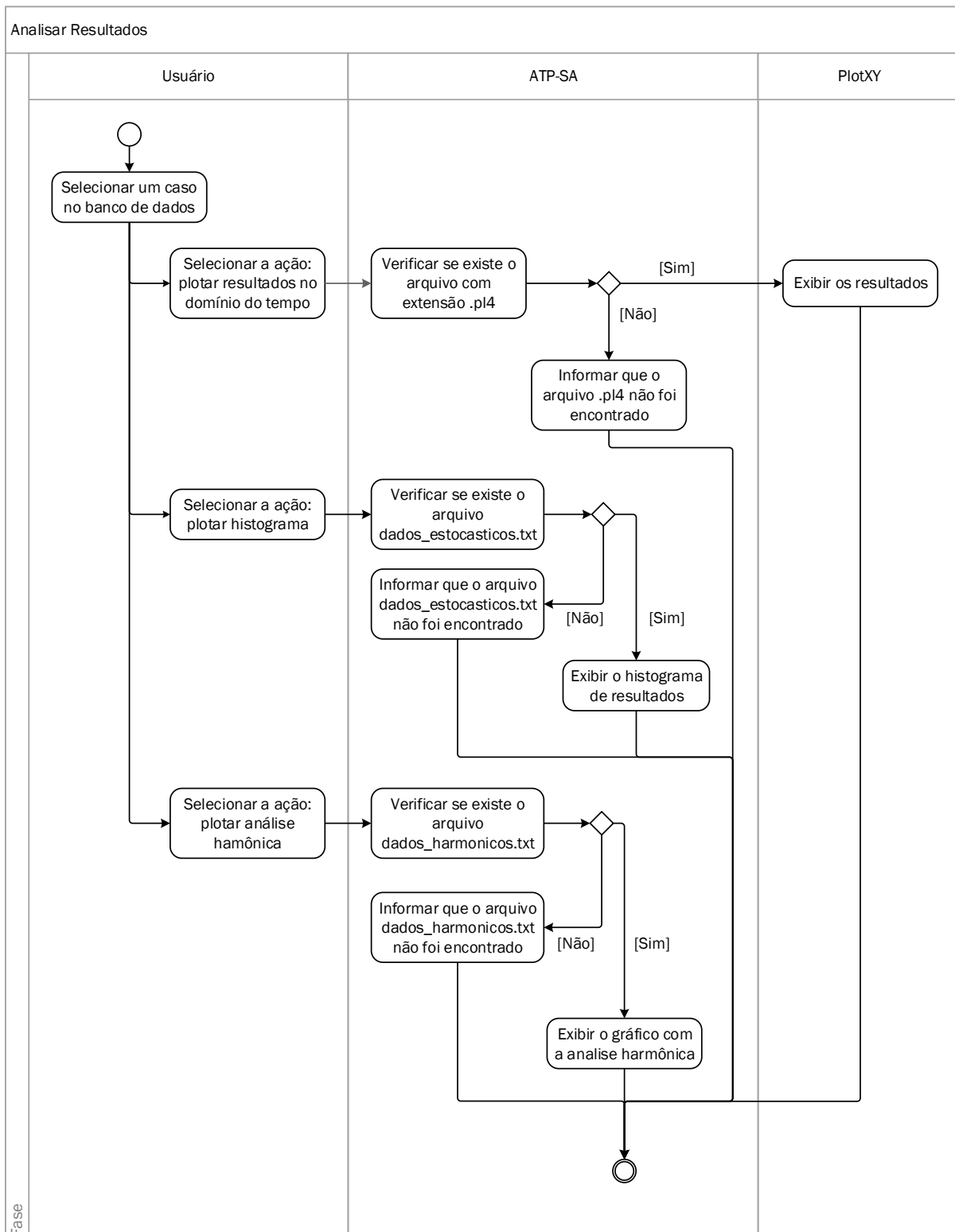
Conforme mapeado no Diagrama de Atividade exibido na Figura 4.9, quando o usuário selecionar a análise no domínio do tempo, o software verificará a existência do arquivo de resultados do ATP-EMTP (com extensão .pl4). Em caso negativo, exibirá uma mensagem informativa e solicitará que a simulação seja realizada novamente. Em caso afirmativo, executará o PlotXY para a exibição dos resultados.

Para a análise dos resultados de simulações estocásticas, o ATP-SA permitirá a elaboração de histogramas de frequências. Como estas simulações preveem a geração de uma série de eventos, a resposta transitória das variáveis monitoradas poderão ser analisadas estatisticamente. Para isso, pode-se utilizar histogramas que exibem o número de ocorrências de determinadas magnitudes da variável de interesse. O software desenvolvido permitirá que gráficos como este sejam gerados diretamente a partir de sua interface gráfica.

Todos os *foreign models* incorporados ao ATP-EMTP pelo LAPES-CEESP, descritos na seção 4.2, geram um arquivo de resultados denominado “dados_estocasticos.txt”. Este arquivo conterá os dados das variáveis monitoradas, selecionadas durante a configuração do estudo, resultantes da simulação estocástica. Desta forma, quando o usuário solicitar a geração de um histograma de resultados, o ATP-SA verificará a existência do referido arquivo, solicitando novamente a execução da simulação em caso negativo. O procedimento descrito é representado no Diagrama de Atividade da Figura 4.9.

No caso de magnetização de transformador, os *foreign models* desenvolvidos especificamente para este tipo de estudo avaliam a composição harmônica da corrente de energização, exportando os dados através de um arquivo denominado “dados_harmonicos.txt”. Na análise destes resultados, o ATP-SA fornecerá suporte para que os dados sejam condicionados na forma de gráficos e exibidos diretamente em sua interface gráfica.

Figura 4.9 – Diagrama de Atividade: Analisar os Resultados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SOFTWARE

Após a definição dos recursos a serem oferecidos pelo software e a modelagem de suas principais funcionalidades através do Diagrama de Casos de Uso e de Diagramas de Atividades apresentados na seção 4.1, passou-se efetivamente a sua implementação. Para esta tarefa, utilizou-se a linguagem de programação Java.

Programas escritos em linguagem Java são independentes de plataforma de hardware e software, pois não são compilados diretamente para código nativo, mas sim para uma forma intermediária de código denominada “*bytecode*”. Após compilado, este código pode ser interpretado por uma Máquina Virtual Java (*Java Virtual Machine – JVM*) compatível com sua versão e com a plataforma operacional do usuário.

No entanto, esta importante característica não foi decisiva para a escolha da linguagem Java, visto que a versão GNU MingW32 do ATP-EMTP, para a qual o software desenvolvido prestará a função de pré-processador gráfico, é específica para sistemas operacionais Windows de 32 bits. O principal motivo que levou a utilização desta linguagem foi a existência de um vasto conjunto de bibliotecas (ou *Application Programming Interfaces – APIs*) gratuitas para o desenvolvimento de aplicações. Além disso, dispõe-se de diversas ferramentas avançadas para a plataforma Java que facilitam a implementação de interfaces gráficas complexas.

Os principais recursos utilizados na concepção do ATP-SA são apresentados na subseção 4.2.1. Já a estrutura do software é descrita na subseção 4.2.2.

4.2.1 Recursos utilizados

Para realizar a implementação do software ATP-SA, utilizou-se as seguintes ferramentas disponibilizadas pela Oracle (2016):

- Plataforma Java: *Standard Edition (Java SE)*;
- *Java SE Development Kit*: JDK 8u40 para SO Windows x86;
- *Java SE Runtime Environment* utilizado durante a fase de desenvolvimento: JRE 8u40 para SO Windows x86;
- Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment – IDE*): NetBeans IDE, versão 8.0.2.

Além das APIs disponibilizadas juntamente com a JDK 8u40, algumas bibliotecas de classes distribuídas sob a *GNU Lesser General Public License* (LGPLv2.1, 1999) foram utilizadas para facilitar a implementação de funções específicas:

- “JFreeChart”, versão 1.0.19 (GILBERT, 2014): utilizada para a geração de histogramas e gráficos de análise harmônica, descritos na seção 4.1, diretamente a partir da interface gráfica do ATP-SA;
- “PDFRenderer”, versão 1.0.5 (SONDERMANN, 2011): permitirá a exibição de um diagrama representativo da subestação em forma vetorial na interface gráfica do software;
- “Substance”, versão 7.3 (GROUCHNIKOV, 2010): utilizada para personalizar a aparência visual (*look & feel*) da interface gráfica do software, tornando-a compatível com o aspecto dos modernos sistemas operacionais.

4.2.2 Diagramas de Classes

Os Diagramas de Classes apresentados entre as Figuras 4.10 e 4.16, representam a estrutura de implementação do software desenvolvido. Para melhor organização destes diagramas, optou-se por agrupar classes relacionadas por funcionalidade. Porém, como uma mesma classe pode ser utilizada para desempenhar várias funções, alguns diagramas apresentarão classes comuns. Por questões de espaço, os atributos e os métodos das classes foram suprimidos.

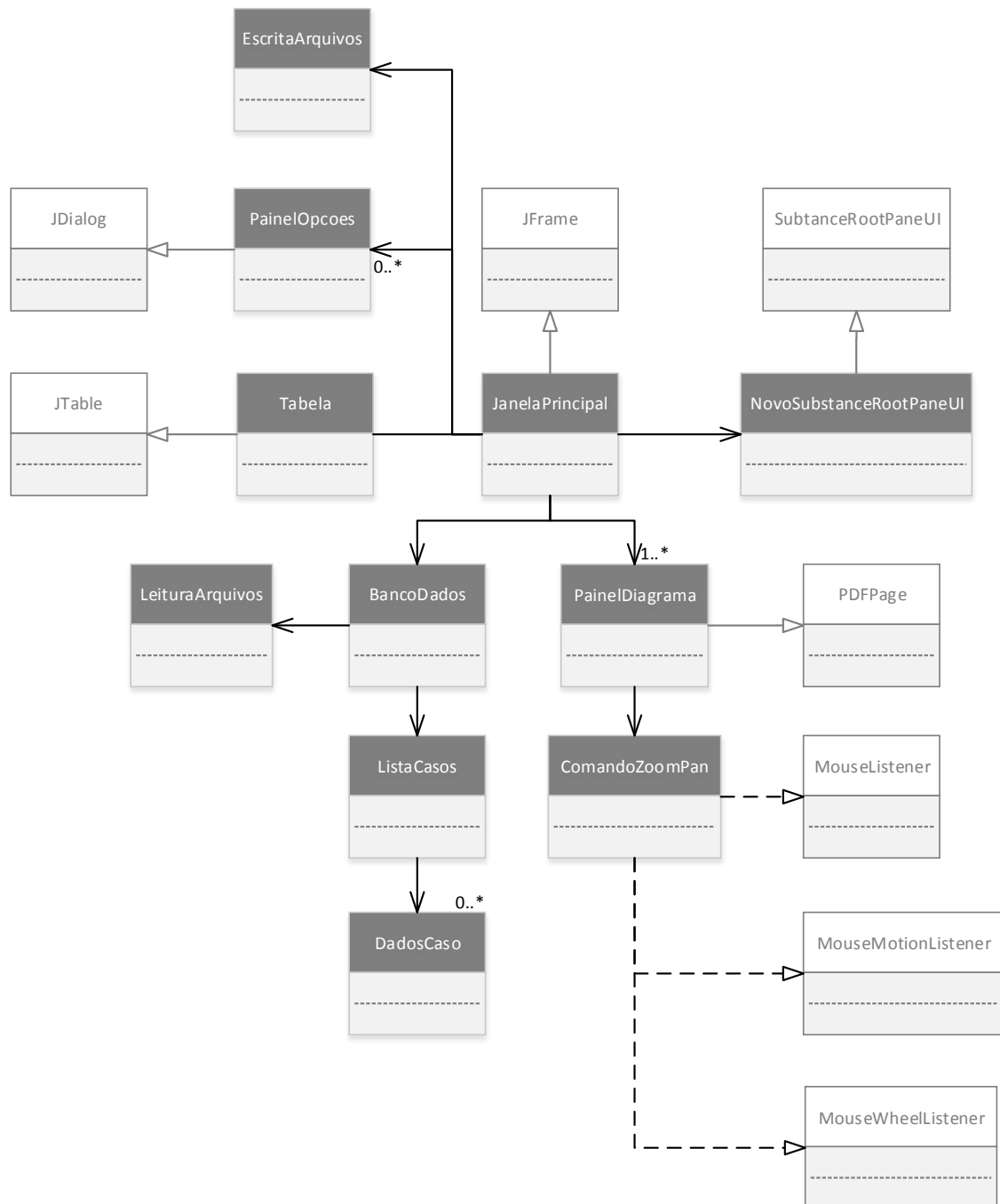
a) Interface do Software

O Diagrama de Classes apresentado na Figura 4.10 reúne as principais classes envolvidas na construção da interface gráfica do ATP-SA e no gerenciamento de seu banco de dados:

1. “JanelaPrincipal”

Classe responsável pela estruturação da janela principal da GUI (*Graphical User Interface*), contendo métodos para personalização de recursos visuais do software, como: barra de menus; barra de ferramentas; barras de rolagem, painéis, entre outros. Para isto, herda (*extends*) recursos da classe “JFrame”, pertencente a biblioteca “Swing” da JDK. Essa classe comporta o método *main* e invoca grande parte das demais classes.

Figura 4.10 – Diagrama de Classes: Interface do Software.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2. “NovoSubstanceRootPaneUI”

Durante a fase de desenvolvimento do software, verificou-se que a classe “SubstanceRootPaneUI”, pertencente a biblioteca externa “Substance”, apresentava um erro de maximização de janela quando a aplicação era executada em máquinas com múltiplos monitores. A classe “NovoSubstanceRootPaneUI”, que herda as características da original, foi criada unicamente para corrigir este erro.

3. “DadosCaso”

Esta classe organiza uma estrutura com todos os parâmetros utilizados para descrever cada caso cadastrado no ATP-SA. Estes parâmetros foram definidos com base nos requisitos identificados na seção 4.1, correspondendo a:

- Nome da subestação analisada;
- Descrição geral da subestação (opcional);
- Nome do autor da simulação;
- Data de realização;
- Tipo de estudo realizado;
- Procedimento de simulação empregado no estudo;
- Descrição geral do estudo (opcional);
- Dados de parametrização do estudo;
- Parâmetros de simulação;
- Pontos de medição de tensão e corrente;
- Localização do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP;
- Localização do arquivo contendo o diagrama da subestação (opcional);
- Localização do arquivo padrão do ATPDraw (opcional).

4. “ListaCasos”

Esta classe forma uma lista com os dados de todos os casos armazenados pelo ATP-SA, contando métodos para inclusão, adição e exclusão de casos. A multiplicidade de associação entre esta e a classe “DadosCaso”, representada no diagrama da Figura 4.10 através de “0..*”, indica que a lista pode conter nenhum ou vários casos.

5. “BancoDados”

Esta classe gerencia as operações de inclusão, adição e exclusão de casos da “ListaCasos”. Além disso, intermedeia ações de importação e exportação de informações entre a lista e o banco de dados armazenado em disco.

6. “LeituraArquivos”

Classe responsável pela importação de dados armazenados em arquivos, como o arquivo do banco de dados e o arquivo padrão do ATP-EMTP.

7. “EscritaArquivos”

Classe responsável pela criação de arquivos para armazenagem de dados em disco. São exemplos o arquivo do banco de dados, cópias de segurança (*backups*) do banco de dados e o arquivo padrão do ATP-EMTP editado pelo software.

8. “Tabela”

Esta classe é um recurso visual do software, construída com a herança da classe “JTable” da biblioteca “Swing”, e que permite exibir dados da lista de casos na forma de uma tabela. Após carregar a lista de casos com os dados armazenados em arquivo, a classe “JanelaPrincipal” exibe a lista para o usuário através de “Tabela”. Esta classe permite ainda que o usuário execute operações sobre a lista utilizando o *mouse* e/ou o teclado. Além das operações permitidas por “ListaCasos”, o usuário pode ainda solicitar a configuração/edição do estudo diretamente a partir de “Tabela”.

9. “PainelDiagrama”

Esta classe também é um recurso visual do software, permitindo a exibição de uma imagem do diagrama representativo da subestação. Foi desenvolvida a partir da herança da classe “PDFPage” da biblioteca externa “PDFRenderer” para que comportasse arquivos vetoriais em *Portable Document Format* (PDF). A multiplicidade de associação “1..*” entre a “JanelaPrincipal” e esta classe, representada no diagrama da Figura 4.10, indica que ao menos um diagrama será exibido na janela principal do software. Este diagrama corresponde a um arquivo padrão vazio carregado quando o software é inicializado.

10. “ComandoZoomPan”

Esta classe permite que o usuário possa mover e dar *zoom* no diagrama da subestação exibido na janela principal do software utilizando o “*mouse*”. Para isso, foi desenvolvida com a implementação (*implements*) das interfaces “MouseListener”, “MouseMotionListener” e “MouseWheelListener” da JDK.

11. “PainelOpcoes”

Esta classe é outro recurso visual do software, construída com a herança da classe “JDialog” da biblioteca “Swing”, e que permite a exibição de mensagens de advertência, erro, informação e confirmação de solicitações.

b) Gerenciar Caso

O diagrama apresentado na Figura 4.11 relaciona as classes envolvidas na funcionalidade “Gerenciar Caso”. Esta ação compreende as atividades: criar novo caso “em branco”, ou a partir de existente (manter caso), editar caso e excluir caso.

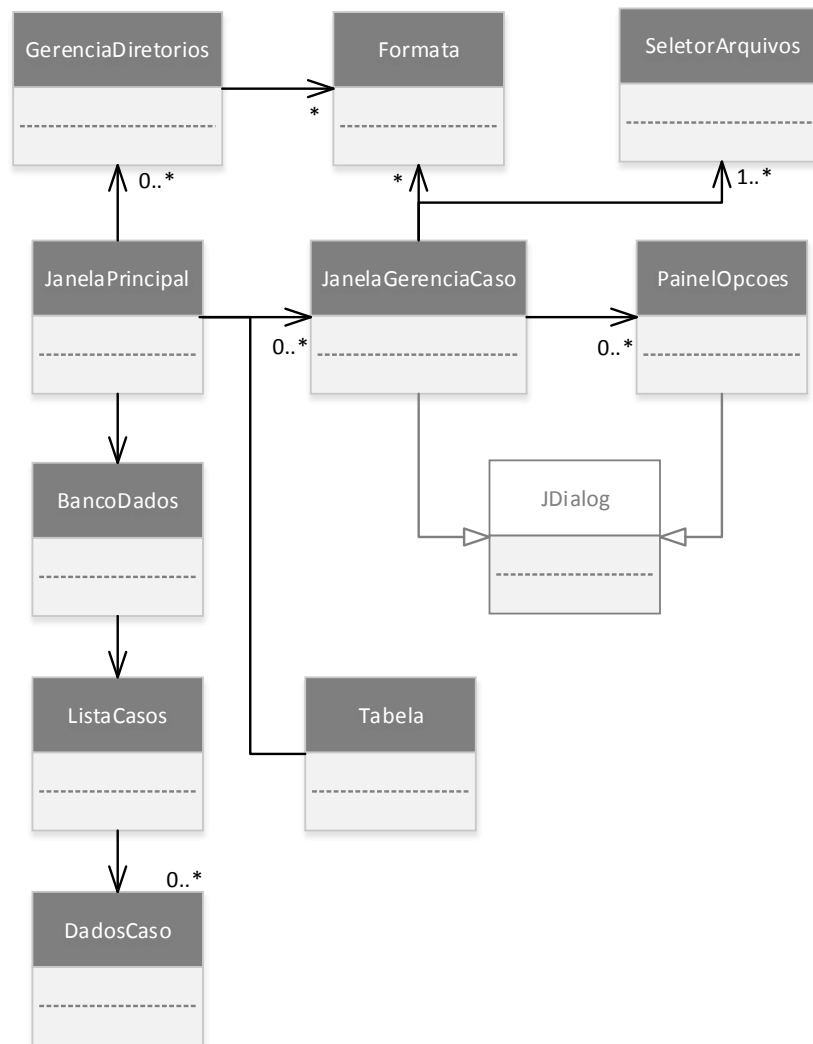
Na função editar caso, as informações gerenciadas foram listadas na descrição do Caso de Uso apresentado no Quadro 4.1, correspondendo a:

- Nome da subestação;
- Descrição geral da subestação;
- Nome do autor da simulação;
- Data de realização;
- Localização do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP;
- Localização do arquivo contendo o diagrama da subestação;
- Localização do arquivo padrão do ATPDraw.

Para editar ou excluir um determinado caso armazenado no banco de dados, o usuário precisará selecioná-lo na lista através do recurso gráfico da classe “Tabela”. Procedimento semelhante deve ser realizado para a criação de um novo caso a partir de outro já existente, onde o usuário precisará selecionar na tabela o caso a ser replicado.

Em vista disso, as classes “DadosCaso”, “ListaCasos”, “BancoDados”, “Tabela” e “JanelaPrincipal”, representadas no diagrama da Figura 4.10, são relacionadas novamente nesta funcionalidade. Além destas, a classe “PainelOpcoes” é novamente utilizada para a exibição de mensagens e confirmação de solicitações (como a confirmação de exclusão de um caso selecionado, por exemplo). Estas classes também serão relacionadas nos demais diagramas apresentados na continuidade desta seção.

Figura 4.11 – Diagrama de Classes: Gerenciar Caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

12. “JanelaGerenciaCaso”

Implementada com a herança de “JDialog” da biblioteca “Swing”, esta classe oferece recursos gráficos para que o usuário possa configurar ou editar as informações descritivas do caso selecionado, listadas anteriormente.

13. “Formata”

Classe responsável pela delimitação de caracteres em campos a serem configurados pelo usuário. Além disso, restringe caracteres de acordo com o tipo de dado:

- Números inteiros
- Números de ponto flutuante
- Cadeias de caracteres (*strings*)

A classe “Formata” também é utilizada na edição do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP, fornecendo a delimitação do número de caracteres para condicionamento de dados em suas respectivas posições.

14. “SeletorArquivos”

Esta classe fornece suporte à vinculação de arquivos durante a criação de um novo caso. Possui métodos para filtrar e verificar as extensões dos arquivos de interesse:

- Arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP: extensão .atp ou .dat;
- Imagem do diagrama da subestação: extensão .pdf;
- Arquivo padrão do ATPDraw: extensão .acp.

15. “GerenciaDiretorios”

Esta classe é responsável pela criação de um diretório específico para cada novo caso cadastrado no ATP-SA, alocando neste todos os seus arquivos. Além disso, é utilizada para deletar o diretório, juntamente com seu conteúdo, quando o caso correspondente é excluído do banco de dados.

c) Configurar/Editar Estudo

A Figura 4.12 apresenta o Diagrama de Classes utilizado pelas funcionalidades “Configurar Estudo” e “Editar Estudo”. As informações gerenciadas nestas funções são:

- Tipo de estudo realizado;
- Procedimento de simulação empregado no estudo;
- Descrição geral do estudo;
- Dados de parametrização do estudo.

Os dados de parametrização são específicos para cada tipo de estudo e procedimento de simulação, conforme representado nos Diagramas de Atividades apresentados no Apêndice A.

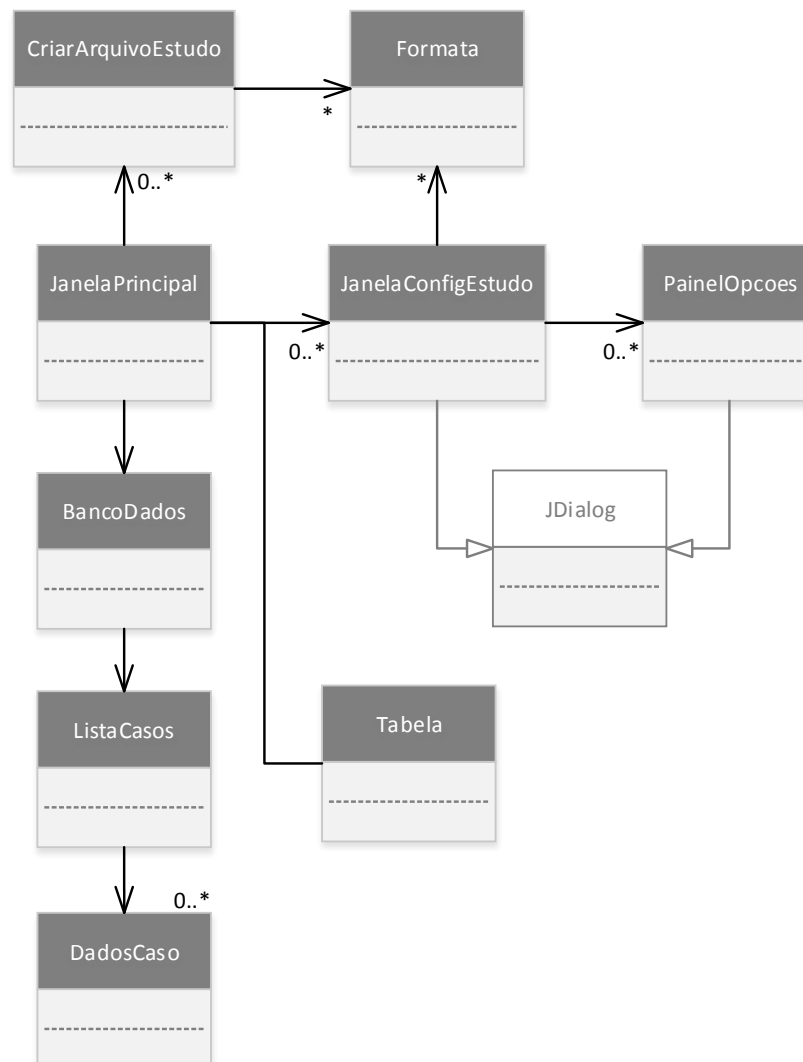
16. “JanelaConfigEstudo”

Esta classe foi implementada com a herança da classe “JDialog” da biblioteca “Swing”. Sua interface gráfica permite que o usuário configure ou edite as informações de configuração do estudo, listadas anteriormente.

17. “CriarArquivoEstudo”

Esta classe é responsável pela criação de cartões para modelagem e simulação do estudo no ATP-EMTP. Os cartões criados para cada tipo de estudo e procedimento de simulação (determinístico ou estocástico) são descritos em detalhes na subseção 4.2.3. Embora o nome da classe utilize o termo “arquivo”, os cartões gerados por ela são mantidos na forma de *strings* para a posterior inserção no arquivo padrão do ATP-EMTP que contém os dados do modelo da subestação.

Figura 4.12 – Diagrama de Classes: Configurar/Editar Estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

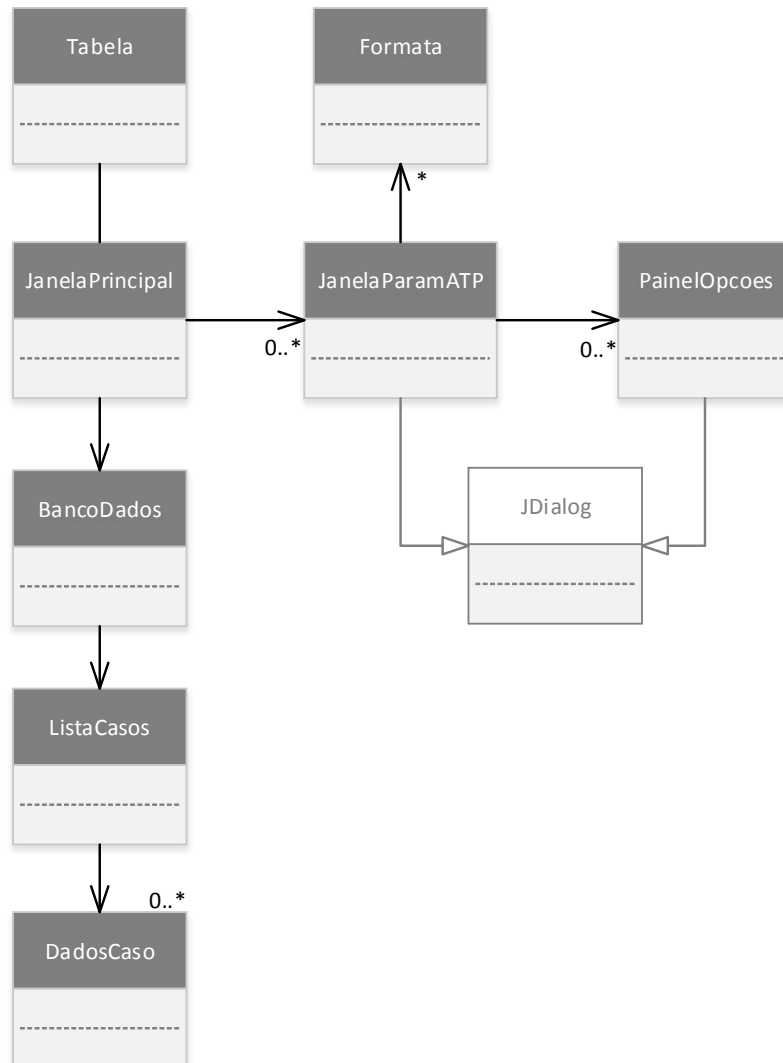
d) Definir Parâmetros de Simulação

O Diagrama de Classes apresentado na Figura 4.13 relaciona as classes utilizadas na ação “Definir Parâmetros de Simulação”. Os parâmetros gerenciados nesta funcionalidade foram listados na documentação do Caso de Uso homônimo realizada no Quadro 4.8.

18. “JanelaParamATP”

Embora o ATP-SA predefina automaticamente os parâmetros de simulação, o usuário poderá editá-los a seu critério. Esta classe, também criada a partir da herança da classe “JDialog”, fornece os recursos de interface para a edição destes parâmetros.

Figura 4.13 – Diagrama de Classes: Definir Parâmetros de Simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

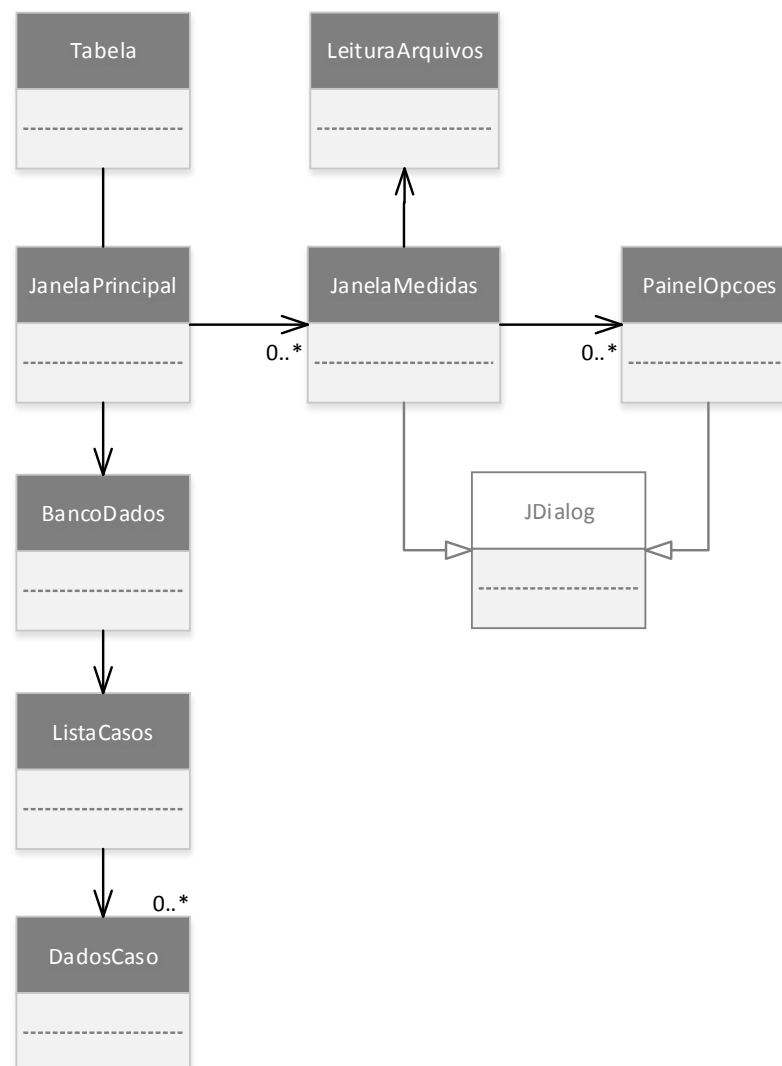
e) Estabelecer Pontos de Medição

O Diagrama de Classes da figura Figura 4.14 apresenta as classes relacionadas na funcionalidade “Estabelecer Pontos de Medição”. A classe “LeituraArquivos” é empregada para identificar os pontos (“nós”) de medição existentes no arquivo padrão do ATP-EMTP do respectivo caso.

19. “JanelaMedidas”

Esta classe, implementada com a herança de “JDialog”, permite ao usuário selecionar os pontos de medição de seu interesse, dentre os já existentes no arquivo padrão do ATP-EMTP. Além disso, permite que o usuário adicione novos pontos de medição.

Figura 4.14 – Diagrama de Classes: Estabelecer Pontos de Medição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

f) Executar Simulação

A Figura 4.15 exibe o diagrama com as classes utilizadas na funcionalidade “Executar Simulação”. Nesta ação, o software desenvolvido utiliza a versão do ATP-EMTP personalizado pelo LAPES-CEESP.

Assim como nos demais Diagramas de Classes apresentados nesta seção, as classes “DadosCaso”, “ListaCasos”, “BancoDados”, “Tabela” e “JanelaPrincipal” são relacionadas novamente na Figura 4.15. Isto se justifica pelo fato de que o usuário precisa selecionar o caso desejado no banco de dados antes de solicitar qualquer ação.

20. “CriaArquivoATPSA”

Classe responsável pela criação de um novo arquivo padrão ATP-EMTP a partir do arquivo original, vinculado durante a criação do respectivo caso. Ao novo arquivo, esta classe realizará a inserção dos cartões de modelagem do estudo, os cartões de parametrização da simulação e os pontos de medição. Nesta atividade, a classe “Formata” é utilizada para adequação dos “nomes” dos “nós” utilizados nos cartões criados, deixando-os em conformidade com “nós” do sistema.

21. “CriarArquivoTemp”

Para que o arquivo padrão original ATP-EMTP não seja perdido após a criação do novo arquivo por “CriaArquivoATPSA”, esta classe realiza a criação de um arquivo temporário com uma cópia do original.

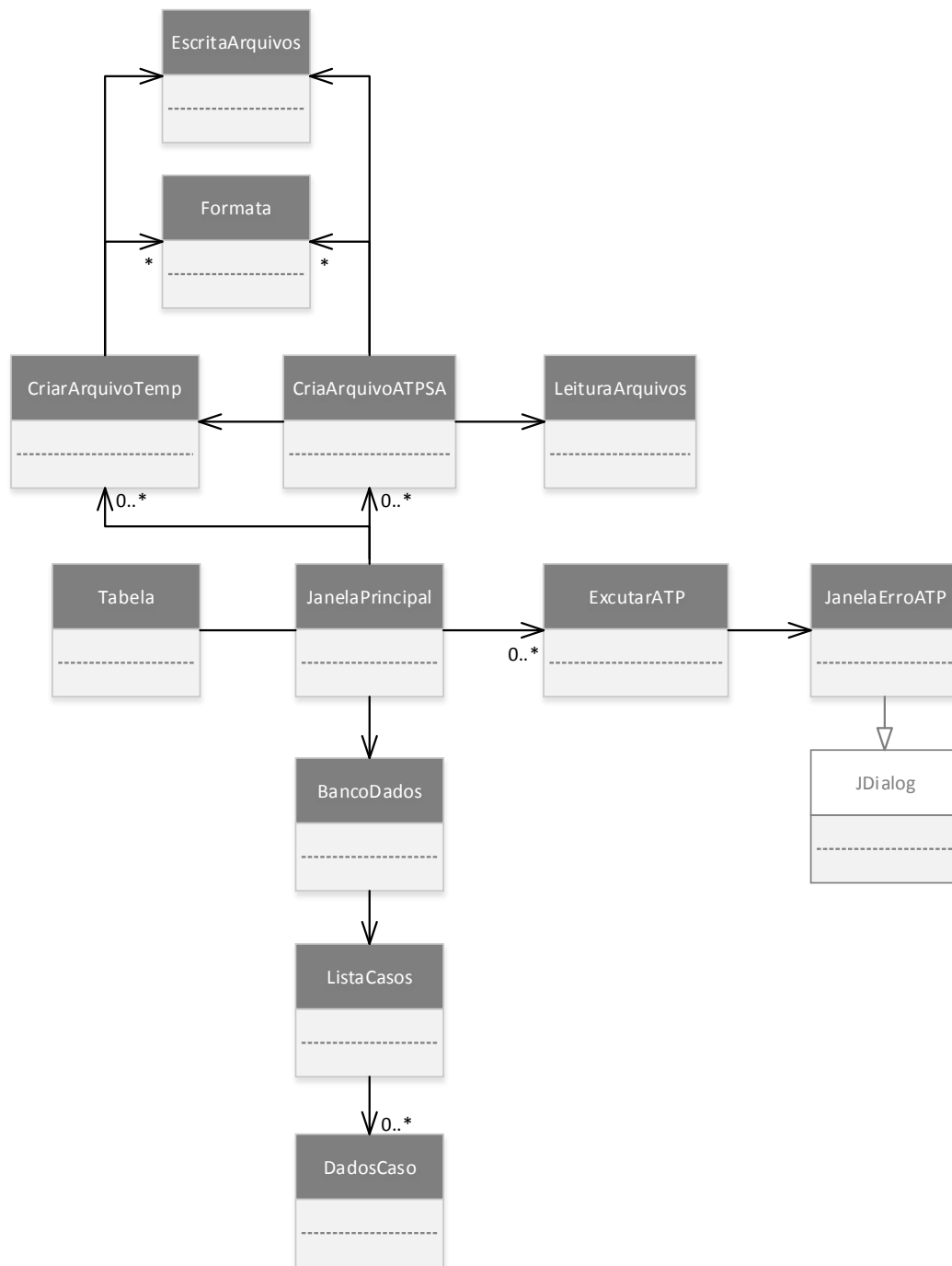
22. “ExecutarATP”

Esta classe é responsável por executar a simulação no ATP-EMTP, endereçando-o o arquivo de entrada, gerado por “CriaArquivoATPSA”, e o diretório de destino dos arquivos de saída. A execução do ATP-EMTP é realizada de forma assíncrona, de modo que outras ações podem ser realizadas no ATP-SA enquanto transcorre a simulação. No entanto, métodos desta classe monitoram o andamento da simulação, bloqueando o comando de execução na interface gráfica do software até o seu término. Após o término de cada simulação, um método desta classe verifica a ocorrência de erros através da inspeção do arquivo de saída com extensão .lis.

23. “JanelaErroATP”

Esta classe é um recurso da interface gráfica utilizado para exibir o relatório do ATP-EMTP na ocasião em que forem constatados erros na simulação.

Figura 4.15 – Diagrama de Classes: Executar Simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

g) Analisar Resultados

Conforme a descrição do Caso de Uso “Analisar Resultados”, apresentada no Quadro 4.10, na análise de resultados da simulação no domínio do tempo, o ATP-SA utiliza o software PlotXY para a geração de gráficos cartesianos. Esta ação é gerenciada pela classe “JanelaPrincipal”, que invoca o programa e endereça o arquivo de resultados com extensão .pl4.

Já os histogramas e os gráficos para análise harmônica são gerados diretamente pelo ATP-SA. Para isso, elaborou-se o conjunto de classes descritas a seguir. O Diagrama de Classes apresentado na Figura 4.16 relaciona todas as classes envolvidas nesta funcionalidade.

24. “GraficoHistograma”

Esta classe realiza o pós-processamento dos dados resultantes de simulações estocásticas, exportados pelos *foreign models* incorporados ao ATP-EMTP através do arquivo denominado “dados_estocasticos.txt”. Este pós-processamento envolve a conversão dos dados para valores em por unidade (p.u.), identificação dos valores limites mínimo e máximo e a discretização em intervalos de frequência.

25. “PainelHistograma”

Classe implementada com a herança da classe “ChartPanel” da biblioteca externa “JFreeChart”, utilizada para gerar graficamente um histograma com os dados pós-processados pela classe “GraficoHistograma”.

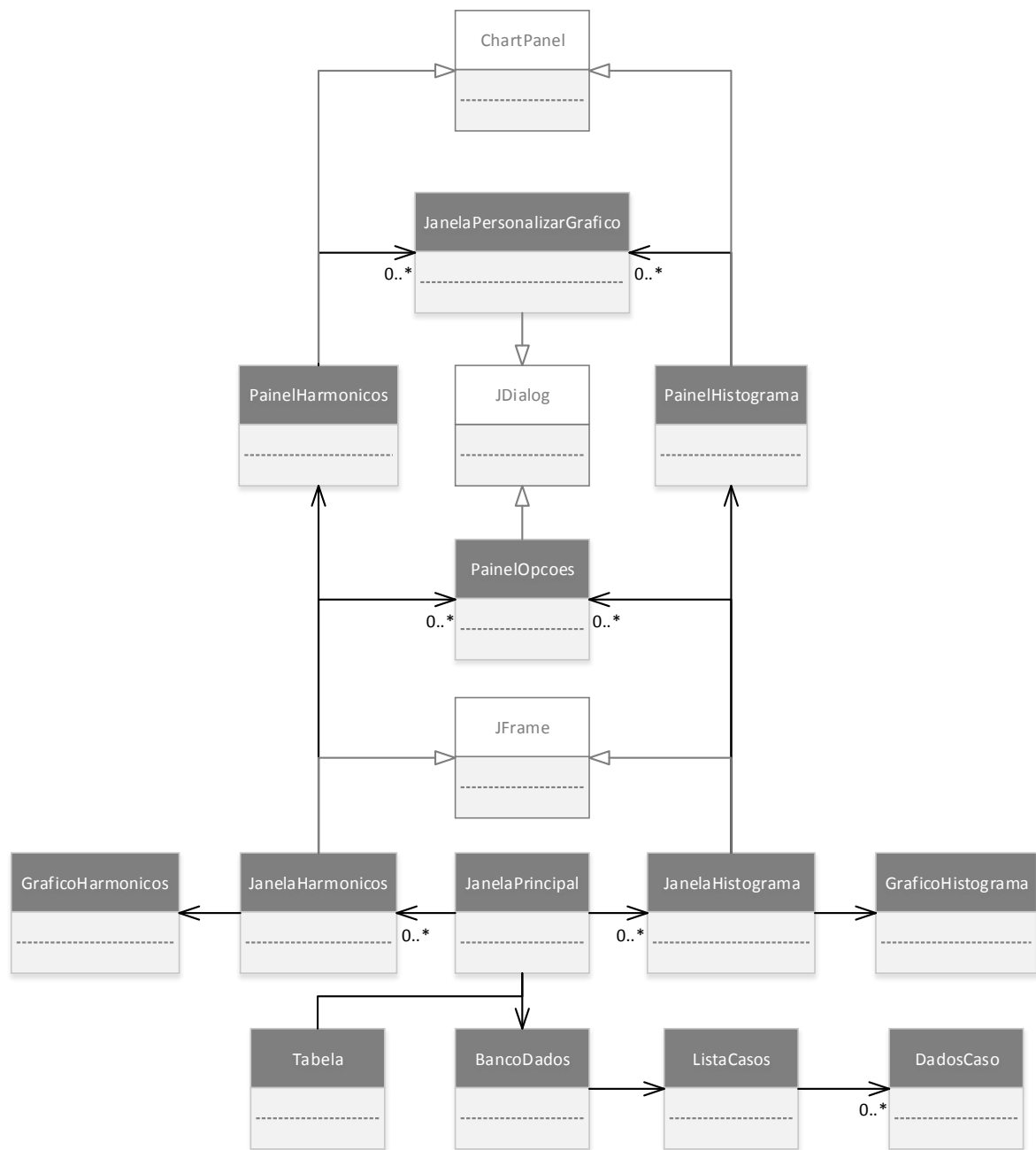
26. “JanelaHistograma”

Recurso da interface gráfica desenvolvido para exibir o histograma gerado pela classe “PainelHistograma”.

27. “GraficoHarmonicos”

Esta classe realiza o pós-processamento dos dados resultantes de simulações determinísticas e estocásticas de energização de transformador, exportados pelos *foreign models* correspondentes através do arquivo denominado “dados_harmonicos.txt”. Este pós-processamento corresponde a conversão das amplitudes dos harmônicos para valores em por unidade p.u.

Figura 4.16 – Diagrama de Classes: Analisar Resultados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

28. “PainelHarmonicos”

Também implementada com a herança da classe “ChartPanel”, utilizada para gerar um gráfico de barras com os dados pós-processados pela classe “GraficoHamonicos”.

29. “JanelaHarmonicos”

Recurso da interface gráfica desenvolvido para exibir o gráfico gerado pela classe “PainelHarmonicos”.

30. “JanelaPersonalizarGrafico”

Classe desenvolvida para a personalização de recursos visuais dos histogramas e gráficos para análise harmônica. Dentre os recursos de personalização disponíveis ao usuário estão: edição do título dos eixos, troca da fonte de marcadores e seleção das cores de preenchimento e contorno das barras.

4.2.3 Gerenciamento do arquivo padrão ATP-EMTP

Conforme descrito na seção 4.1, o software desenvolvido atua como pré-processador gráfico para a versão do ATP-EMTP personalizada pelo LAPES-CEESP, na qual foram incorporadas ferramentas denominadas *foreign models* que permitem simular os eventos de interesse de forma estocástica. A Tabela 4.1 apresenta um resumo com os *foreign models* utilizados em cada estudo e as variáveis monitoradas na análise estocástica, já relacionadas nos Diagramas de Atividades do Apêndice A.

Tabela 4.1 – Relação de *foreign models* incorporados ao ATP-EMTP (LAPES-CEESP, 2016).

Tipo de estudo	<i>foreign models</i>	Variáveis analisadas
Curto-circuito	“SHORTCIRCUIT”	Corrente e tensão
Energização de TR	“INRUSH” e “HARMONIC”	Corrente
Manobra de disjuntor	“SWITCHING”	Tensão
Descarga atmosférica	“LIGHTNING”	Tensão

Fonte: Elaborado pelo autor.

O *foreign model* “HARMONIC” pode inclusive ser utilizado para realizar a análise harmônica da corrente de energização de transformadores em simulações determinísticas. O ATP-SA também fornece suporte para sua utilização neste tipo de estudo.

Retomando o que foi mencionado anteriormente, a classe “CriarArquivoEstudo” é responsável pela modelagem do estudo realizado através da criação de cartões no padrão ATP-EMTP. Os cartões criados por esta classe são específicos para cada tipo de estudo e procedimento de simulação (determinístico ou estocástico), sendo apresentados a seguir.

Nos cartões apresentados, os campos identificados com o padrão “X _ _” correspondem as “nós” do sistema ou valores informados na configuração do estudo. Já os identificados pelo padrão “ATP _ _ _” são “nós” criados pelo ATP-SA para conexão de elementos internamente.

a) Simulações de Curto-circuito

Para simulações determinísticas de curto-circuito, o disjuntor que realizará a abertura para isolar a falta e o posterior religamento do sistema, bem como o ponto em que ocorrerá o curto-circuito são modelados através de chaves controladas por tempo (*Time-controlled Switches*). Os cartões criados no padrão ATP-EMTP para estes elementos são apresentados no Quadro 4.16.

Nas simulações estocásticas, os elementos citados são modelados através de chaves controladas por TACS (*TACS-controlled Switches – Type 13*). Os cartões criados para estes elementos são apresentados no Quadro 4.17. Por questões de espaço, os cartões desenvolvidos para acessar o *foreign model* “SHORTCIRCUIT”, responsável por comandar as chaves *Type 13*, são apresentados no Apêndice B.

Quadro 4.16 – Cartões “SWITCH” para simulações determinísticas de curto-circuito.

/SWITCH						
C ----- DISJUNTOR						
C	< n 1>	< n 2>	Tclose	><Top/Tde >>	Ie	><Vf/CLOP >> type >
	X01A	X02A	X03	X04	1.E10	RECLOSE 0
			X05	X06		
			9999.			
	X01B	X02B	X07	X08	1.E10	RECLOSE 0
			X09	X10		
			9999.			
	X01C	X02C	X11	X12	1.E10	RECLOSE 0
			X13	X14		
			9999.			
C ----- CURTO-CIRCUITO						
C	< n 1>	< n 2>	Tclose	><Top/Tde >>	Ie	><Vf/CLOP >> type >
	X02A	ATPSAA	X15	X16	1.E10	0
	X02B	ATPSAB	X17	X18	1.E10	0
	X02C	ATPSAC	X19	X20	1.E10	0
C -----						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.17 – Cartões “SWITCH” para simulações estocásticas de curto-circuito.

/SWITCH						
C ----- DISJUNTOR						
C	< n 1>	< n 2>	Tclose	><Top/Tde >>	Ie	><Vf/CLOP >> type >
	13X01A	X02A				ATPDJA 0
	13X01B	X02B				ATPDJB 0
	13X01C	X02C				ATPDJC 0
C ----- CURTO-CIRCUITO						
C	< n 1>	< n 2>	Tclose	><Top/Tde >>	Ie	><Vf/CLOP >> type >
	13X03A	ATPSAA				ATPCCA 0
	13X03B	ATPSAB				ATPCCB 0
	13X03C	ATPSAC				ATPCCC 0
C -----						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto nas simulações determinísticas como estocásticas de curto-circuito, a impedância de falta é modelada utilizando resistores da classe “BRANCH”. Os cartões para esta modelagem são apresentados no Quadro 4.18.

Quadro 4.18 – Cartões “BRANCH” para simulações de curto-circuito.

/BRANCH			
C -----			RESISTENCIA DE FALTA
C	< n1 >> n2 ><ref1><ref2>< R	>< L >< C >	
C	< n1 >> n2 ><ref1><ref2>< R	>< A >< B ><Leng><>>0	
	ATPSAA	X01	0
	ATPSAB	X02	0
	ATPSAC	X03	0
C -----			

Fonte: Elaborado pelo autor.

b) Simulações de Energização de Transformador

Nas simulações de energização de transformador, o disjuntor é modelado através de chaves controladas por TACS (*Type 13*), cujos cartões são apresentados no Quadro 4.19. No caso determinístico, estas chaves são comandadas pelo *foreign model* “HARMONIC” e no caso estocástico pelo *foreign model* “INRUSH”. Os cartões para o acesso destes elementos são apresentados no Apêndice C e no Apêndice D, respectivamente.

Quadro 4.19 – Cartões “SWITCH” para simulações de energização de TR.

/SWITCH			
C -----			DISJUNTOR
C	< n 1>> n 2>< Tclose ><Top/Tde ><	Ie ><Vf/CLOP >< type >	
	13X01A X02A		ATPDJA 0
	13X01B X02B		ATPDJB 0
	13X01C X02C		ATPDJC 0
C -----			

Fonte: Elaborado pelo autor.

c) Simulações de TRT em Disjuntor

Durante a etapa de modelagem das funcionalidades do software, apresentada na seção 4.1 informou-se que o ATP-SA comportaria apenas simulações de caráter determinístico para análise de TRT em disjuntor. Em simulações como estas, o software emprega a modelagem de disjuntor no ATP-EMTP apresentada por Silva et al. (2015), que considera elementos como: resistência e capacitância entre contatos, capacitâncias para terra e resistência de arco elétrico.

A partir da tensão nominal do sistema no ponto de instalação do disjuntor, informada pelo usuário durante a configuração do estudo, o ATP-SA seleciona valores típicos para os parâmetros mencionados. Estes valores foram compilados por Silva et al. (2015), e abrangem disjuntores para as tensões de 69 kV, 138 kV, 230 kV e 345 kV.

Os Quadros 4.20 e 4.21 apresentam, respectivamente, cartões das classes “SWITCH” e “BRANCH” para representação do disjuntor, com parâmetros de modelagem para 230 kV. Já os cartões da classe “MODELS”, que completam este modelo, são apresentados no Apêndice E.

Quadro 4.20 – Cartões “SWITCH” para simulações de TRT em disjuntor.

C ----- TRT DISJUNTOR						
/SWITCH						
C	< n 1 >	< n 2 >	Tclose	><Top/Tde >>	Ie	><Vf/CLOP >> type >
	ATP01	X02A				MEASURING
	X01A	ATP02	-1.	X01	5.	
13	ATP16	X01A				ATP08
13	X01A	ATP19				ATP09
	ATP03	X02B				MEASURING
	X01B	ATP04	-1.	X02	5.	
13	ATP17	X01B				ATP11
13	X01B	ATP20				ATP12
	ATP05	X02C				MEASURING
	X01C	ATP06	-1.	X03	5.	
13	ATP18	X01C				ATP14
13	X01C	ATP21				ATP15
C -----						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.21 – Cartões “BRANCH” para simulações de TRT em disjuntor de 230 kV.

C ----- TRT DISJUNTOR 230 KV						
/BRANCH						
C	< n1 >	< n2 >	><ref1><ref2>>	R	>< L >>	C >
C	< n1 >	< n2 >	><ref1><ref2>>	R	>< A >>	B ><Leng><><>0
91	ATP01	ATP16	TACS	ATP07		0
	ATP01	ATP16	NAME	PHASOR	1.	
91	ATP03	ATP17	TACS	ATP10		0
	ATP03	ATP17	NAME	PHASOR	1.	
91	ATP05	ATP18	TACS	ATP13		0
	ATP05	ATP18	NAME	PHASOR	1.	
	X01A				5.E-3	0
	ATP01				5.E-3	0
	ATP19	ATP01			5.E-2	0
	ATP02	ATP01		.001		0
	X01B				5.E-3	0
	ATP03				5.E-3	0
	ATP20	ATP03			5.E-2	0
	ATP04	ATP03		.001		0
	X01C				5.E-3	0
	ATP005				5.E-3	0
	ATP21	ATP05			5.E-2	0
	ATP06	ATP05		.001		0
C -----						

Fonte: Elaborado pelo autor.

d) Simulações de Manobras de Disjuntor

Para simulações determinísticas de manobras, o disjuntor é modelado através de chaves controladas por tempo, conforme indicado no Quadro 4.22. O arranjo de cartões da classe “SWITCH” permite a realização de até quatro operações (duas aberturas e dois fechamentos) independentemente do estado inicial e final do disjuntor. Este número de operações possibilita simular sequência de eventos como:

- 1 – Disjuntor inicialmente fechado;
- 2 – Abertura devido a ocorrência de curto-circuito;
- 3 – Tentativa de religamento (sem sucesso);
- 4 – Reabertura do disjuntor.

Quadro 4.22 – Cartões “SWITCH” para simulações determinísticas de manobras de disjuntor.

/SWITCH							DISJUNTOR
C	< n 1	>> n 2	>> Tclose	>>Top/Tde	>> Ie	>>Vf/CLOP	>> type
X01A	X02A	X03	X04	1.E10	RECLOSE	0	
		X05	X06				
		X07	X08				
		9999.					
X01B	X02B	X09	X10	1.E10	RECLOSE	0	
		X11	X12				
		X13	X14				
		9999.					
X01C	X02C	X15	X16	1.E10	RECLOSE	0	
		X17	X18				
		X19	X20				
		9999.					
C	-----						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já nas simulações estocásticas de manobras, o disjuntor é modelado através de chaves controladas por TACS (*Type 13*). Os cartões para esta modelagem são apresentados no Quadro 4.23. Durante a simulação, as chaves são comandadas pelo *foreign model* “SWITCHING”, cujos cartões da classe “MODELS” são apresentados no Apêndice F.

Quadro 4.23 – Cartões “SWITCH” para simulações estocásticas de manobras de disjuntor.

/SWITCH							DISJUNTOR
C	< n 1	>> n 2	>> Tclose	>>Top/Tde	>> Ie	>>Vf/CLOP	>> type
13X01A	X02A					ATPDJA	0
13X01B	X02B					ATPDJB	0
13X01C	X02C					ATPDJC	0
C	-----						

Fonte: Elaborado pelo autor.

e) Simulações de Descargas Atmosféricas

Nos estudos de descargas atmosféricas, o ATP-SA possibilita ao usuário escolher entre dois métodos de representação da corrente de descarga: forma de onda Dupla Rampa ou forma de onda Heidler. Para as simulações determinísticas, estas formas são modeladas através de fontes de corrente *2-Slope Ramp – Type 13* (Quadro 4.24) e *Surge Function Heidler – Type 15* (Quadro 4.25), respectivamente.

Quadro 4.24 – Cartões “SOURCE” com fonte Dupla Rampa para simulações determinísticas de descargas atmosféricas.

```

/SOURCE
C ----- FONTE DUPLA RAMPA
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
13X01 -1 X02 X03 X04 X05 X07 X08
C -----

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.25 – Cartões “SOURCE” com fonte tipo Heidler para simulações determinísticas de descargas atmosféricas.

```

/SOURCE
C ----- FONTE HEIDLER
C < n 1><>< T1 T2 Perc peak><-key-----><N< TSTART >< TSTOP >
15X01 -1 X02 X02 0.0 X03 Heidler in-line X X04 1.E3
C -----

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já nas simulações estocásticas, o próprio *foreign model* “LIGHTNING” é capaz de gerar os dois tipos de formas de onda. No entanto, como a saída deste elemento é adimensional, precisa ser convertida em fonte de corrente antes da conexão com o sistema. Para isso, utiliza-se uma *TACS-controlled Source – Type 60* (Quadro 4.26).

Quadro 4.26 – Cartões “SOURCE” para simulações estocásticas de descargas atmosféricas.

```

/SOURCE
C ----- FONTE CONTROLADA
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
60X01 -1 -1. 1.E3
C -----

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto nas simulações determinísticas como estocásticas, a impedância de surto do sistema no ponto de incidência da descarga atmosférica é modelada através de um resistor da classe “BRANCH”. O cartão responsável por esta modelagem é apresentado no Quadro 4.27.

Quadro 4.27 – Cartões “BRANCH” para simulações de descargas atmosféricas.

/BRANCH			RESISTENCIA DE SURTO
C	-----		
C	< n1 >> n2 ><ref1><ref2>< R	>< L >< C >	
C	< n1 >> n2 ><ref1><ref2>< R	>< A >< B ><Leng><><>0	
	X01	X02	0
C	-----		

Fonte: Elaborado pelo autor.

f) Parâmetros de Simulação

De acordo com o tipo de estudo e o procedimento de simulação selecionados pelo usuário na configuração do estudo, o ATP-SA indicará valores para o passo de integração e para o tempo total de simulação a serem utilizados. Os valores recomendados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de simulação predefinidos pelo ATP-SA.

Tipo de estudo	dT	$Tmax$
Curto-circuito	1×10^{-4} s	0,5 s para cada evento simulado
Energização de TR	$6,510 \times 10^{-5}$ s	1,0 s para cada evento simulado
TRT em disjuntor	1×10^{-5} s	0,5 s
Manobra de disjuntor	1×10^{-5} s	0,2 s para cada evento simulado
Descarga atmosférica	1×10^{-7} s	0,03 s para cada evento simulado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores indicados pelo ATP-SA foram determinados com base em várias simulações e análises realizadas durante o desenvolvimento do presente trabalho. Os valores definidos para o dT de cada estudo visam reduzir o tempo de simulação, porém, mantendo representatividade dos resultados. Uma atenção especial é dada ao estudo de energização de transformador, no qual o passo de integração é calculado de modo que um ciclo de 60 Hz tenha 256 pontos. Este valor garante uma boa resposta do algoritmo que estima a composição harmônica da corrente de energização, implementado no ATP-EMTP personalizado pelo LAPES-CEESP e descrito no Relatório Final do Projeto de P&D CEEE-GT (LAPES-CEESP, 2016).

Os valores de $Tmax$ indicados pelo ATP-SA buscam proporcionar ao usuário condições de analisar a totalidade (ou a porção mais significativa) da resposta transitória do evento simulado. Para as simulações estocásticas, o software multiplicará automaticamente o valor indicado na Tabela 4.2 pelo número de eventos escolhido pelo usuário na configuração do estudo.

Além dos parâmetros descritos, O ATP-SA inicializa também os demais parâmetros de simulação identificados no Quadro 4.8. No entanto, estes são comuns a todos os tipos e procedimentos de estudo:

- *Xopt* (valor padrão: 0 – indica que os indutores serão parametrizados através de sua indutância, em mH);
- *Copt* (valor padrão: 0 – indica que os capacitores serão parametrizados através de sua capacitância, em μF);
- *Freq* (valor padrão: frequência nominal do sistema em regime permanente não informada).

Além dos cartões para modelagem do estudo no formato padrão do ATP-EMTP, o ATP-SA também cria os cartões necessários à configuração dos parâmetros de simulação. Estes são apresentados no Quadro 4.28.

Quadro 4.28 – Cartões “MISCELLANEOUS” para configuração dos parâmetros de simulação.

C	-----	FREQUENCIA DO SISTEMA
POWER FREQUENCY	X0	
C	-----	MISCELLANEOUS
C	dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>	
	X01 X02 X3 X4	
	500 1 1 1 1 0 0 1 0	
C	-----	

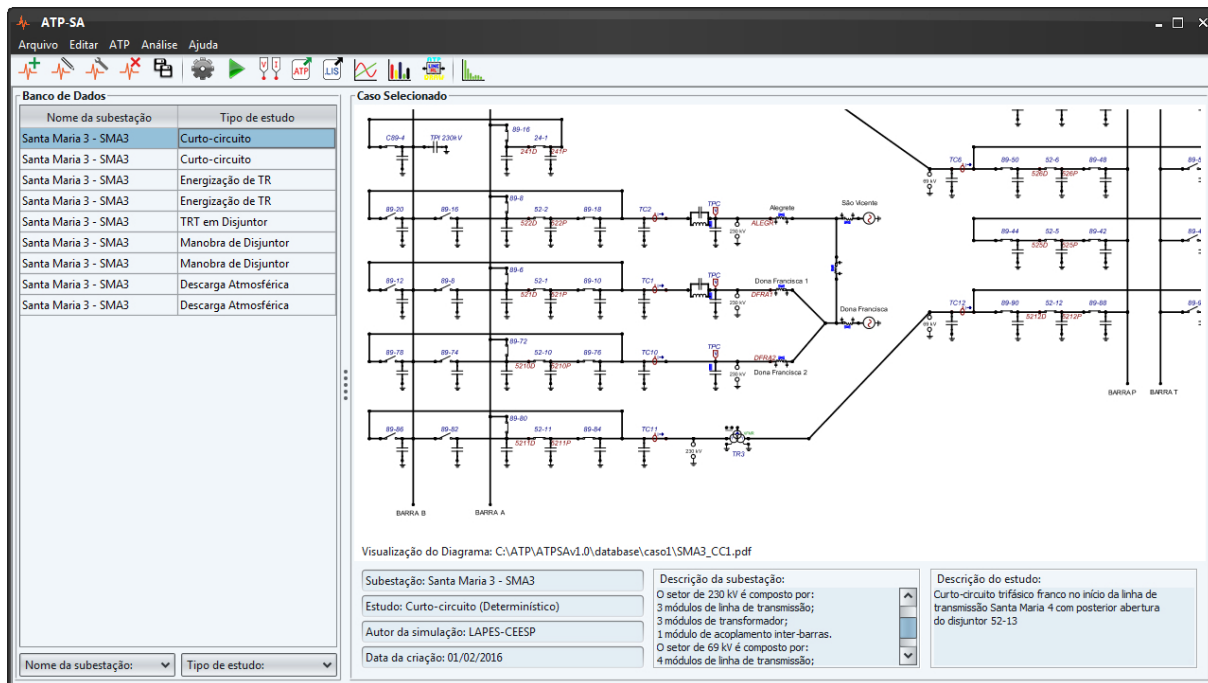
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Interface gráfica

Na maioria das aplicações modernas, a GUI se tornou um elemento de suma importância, pois é responsável pela primeira percepção do usuário sobre o software. Além disso, pode melhorar sua usabilidade, tornando-o mais “amigável” ao usuário.

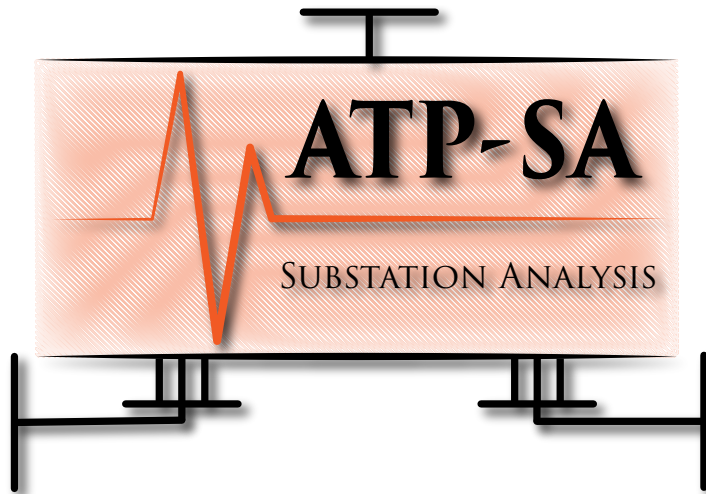
A GUI do ATP-SA foi essencialmente desenvolvida a partir da biblioteca “Swing” da JDK, que fornece uma série de classes aprimoradas para a criação de elementos de interface gráfica, tais como: botões, campos de texto, caixas de seleção, barras de ferramentas, tabelas e muitos outros. Para a aparência visual (*look & feel*), conforme descrito na subseção 4.2.1, utilizou-se a biblioteca externa “Substance”, que disponibiliza recursos para personalização da interface gráfica. Na Figura 4.17, pode-se visualizar o aspecto final da GUI desenvolvida, e na Figura 4.18 a Tela de Abertura (*Splash Screen*) exibida durante sua inicialização.

Figura 4.17 – GUI do software desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.18 – Tela de Abertura do software desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.17, pode-se verificar no painel esquerdo da janela a tabela que permite ao usuário gerenciar casos armazenados no banco de dados. No painel inferior direito, o usuário pode visualizar as informações do caso selecionado na tabela e, ao centro, o seu diagrama representativo.

Para melhor organização das funcionalidades do software, agrupou-se as seguintes opções através da Barra de Menus:

- Menu Arquivo:
 - Criar novo caso “em branco”;
 - Criar novo caso a partir de existente;
 - Importar banco de dados;
 - Salvar banco de dados;
 - Sair;
- Menu Editar:
 - Pesquisar/filtrar banco de dados;
 - Editar caso;
 - Configurar/Editar estudo;
- Menu ATP:
 - Configurar parâmetros de simulação;
 - Estabelecer pontos de medição;
 - Executar simulação;
 - Abrir arquivo de entrada (.atp);
 - Abrir arquivo de saída (.lis);
 - Abrir ATPDraw;
- Menu Análise:
 - Gerar gráfico com PlotXY;
 - Gerar histograma;
 - Gerar gráfico de análise harmônica;
- Menu Ajuda:
 - Conteúdo da ajuda;
 - Tela de abertura;
 - Sobre o ATP-SA.

Para facilitar o acesso pelo usuário, as principais funcionalidades listadas ainda foram organizadas em uma Barra de Ferramentas, conforme pode ser visualizado na Figura 4.17. Os demais recursos de interface do software são exibidos juntamente com o exemplo de aplicação abordado no capítulo 5.

5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

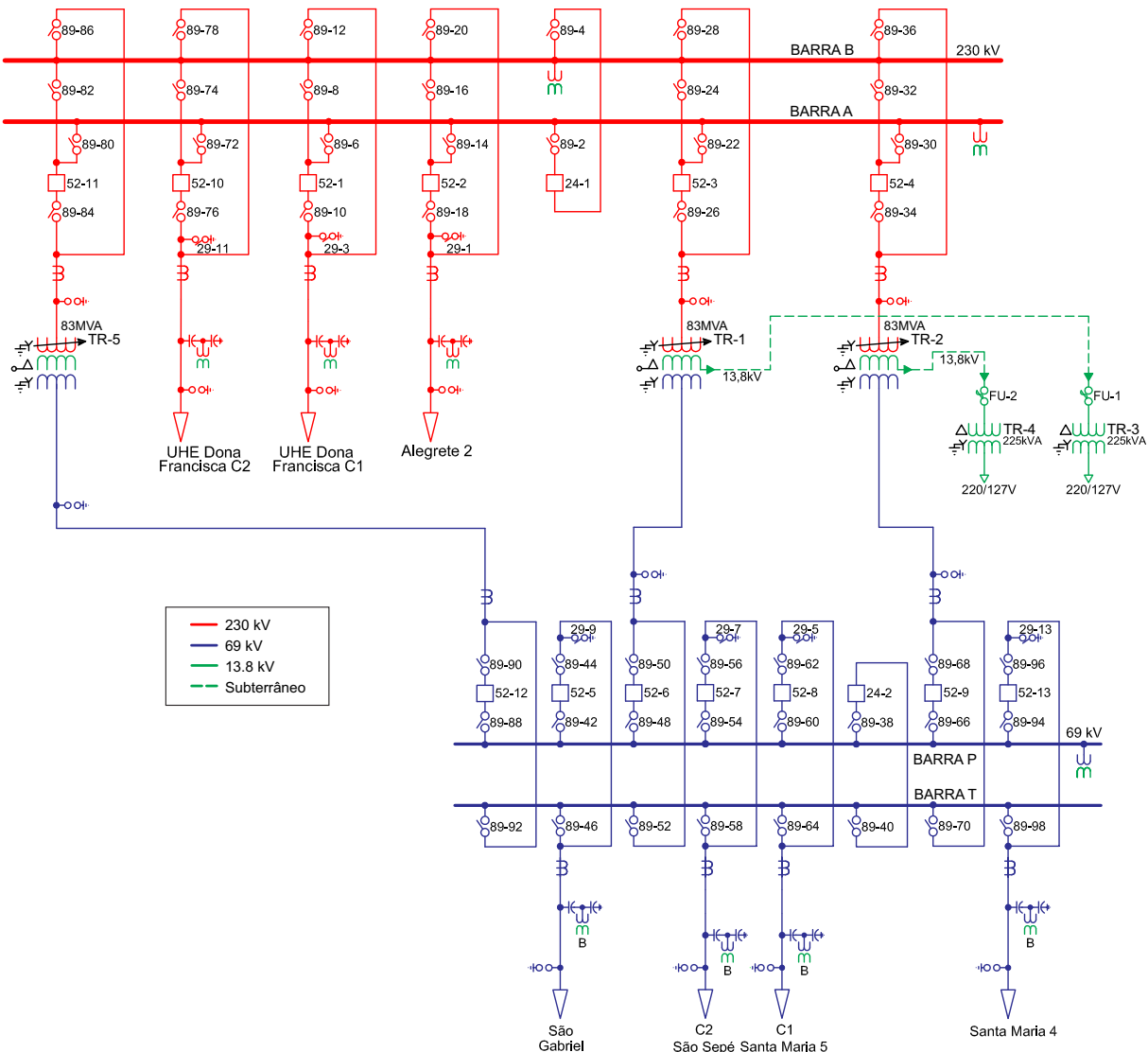
Neste capítulo são demonstrados alguns exemplos de aplicação do pré-processador gráfico desenvolvido, buscando evidenciar suas potencialidades para simulação e análise de transitórios eletromagnéticos em subestações. O sistema elétrico utilizado nestes exemplos compreende a subestação denominada “Santa Maria 3” (SMA3), localizada no município de Santa Maria – RS. Visando demonstrar as principais funcionalidades do software, os seguintes eventos são abordados nas simulações: curtos-circuitos, energizações de transformador de potência, TRT em disjuntor, manobras de disjuntor e descargas atmosféricas.

5.1 SISTEMA ELÉTRICO ABORDADO

A subestação SMA3 é integrante da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo gerenciada pela CEEE-GT, com exceção da linha de transmissão UHE Dona Francisca C2, que tem operação e manutenção sob responsabilidade da Omega Energia Renovável S.A. Esta subestação (Figura 5.1) é composta de:

- Um setor de 230 kV com:
 - Arranjo de barramento duplo;
 - Um módulo de acoplamento inter-barras;
 - Três módulos de transformador de potência;
 - Três módulos de linha de transmissão (LT): Alegrete 2; Usina Hidrelétrica (UHE) Dona Francisca C1 e Usina Hidrelétrica (UHE) Dona Francisca C2.
- Um setor de 69 kV com:
 - Arranjo de barramento do tipo principal-transferência;
 - Um módulo de acoplamento inter-barras;
 - Três módulos de transformador de potência;
 - Quatro módulos de linha de transmissão: Santa Maria 4; Santa Maria 5 C1; São Sepé C2 e São Gabriel.
- Três transformadores de potências de 230 kV / 69 kV / 13,8 kV – 50 MVA (ONAN) / 66,5 MVA (ONAFI) / 83 MVA (ONAFII);
- Dois transformadores para serviço auxiliar de 13,8 kV / 220-127 V – 225 kVA.

Figura 5.1 – Diagrama representativo da subestação Santa Maria 3.



Fonte: Adaptado de CEEE-GT (2014).

Conforme descrito no capítulo 4, para simular a ocorrência de eventos precursoros de transitórios eletromagnéticos por intermédio do ATP-SA, é necessário que o usuário disponha do modelo do sistema elétrico analisado, representado através do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP. Ressalta-se novamente que a metodologia de modelagem do sistema e a representação deste arquivo não são contempladas nos objetivos deste trabalho.

No caso da subestação SMA3, tais procedimentos estão descritos no Relatório Final do Projeto de P&D CEEE-GT 9947883 (LAPES-CEESP, 2016). Neste relatório, aborda-se também o procedimento para obtenção de equivalentes elétricos do SIN através do software de Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS[®]) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

Conforme descrito no referido relatório, a subestação SMA3 foi representada através de dois modelos distintos: um para simulação de eventos precursores de transitórios de baixas e médias frequências e outro para transitórios de altas frequências. Para facilitar o processo de criação do arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP, utilizou-se o software ATPDraw.

No Quadro 5.1 apresenta-se um resumo dos principais elementos utilizados na modelagem da subestação. Maiores detalhes estão disponíveis no Relatório Final LAPES-CEESP (2016).

Quadro 5.1 – Resumo da modelagem de componentes da subestação.

Elementos	Modelo para baixas e médias frequências	Modelo para altas frequências
Para-raios	Resistor dependente de corrente (<i>Type 92</i>)	Modelo IEEE
Disjuntores e seccionadoras	Chave controlada por tempo (<i>Time-controlled Switch</i>)	Chave controlada por tempo, capacitâncias para terra e entre contatos
Linhas de transmissão e cabos de interligação	PI-equivalente concentrado (componentes simétricas)	Modelo dependente da frequência de JMarti
Transformadores de corrente (TCs)	–	Capacitâncias para terra
Transformadores de potencial capacitivo (TPCs) e indutivo (TPIs)	Capacitâncias para terra	
Transformadores de potência	Modelo Híbrido (<i>Hybrid Transformer Model</i>)	
Equivalentes elétricos	Fonte de tensão cossenoidal (<i>Type 14</i>) e elemento PI-equivalente concentrado (componentes simétricas)	
Cargas	Impedância constante concentrada	

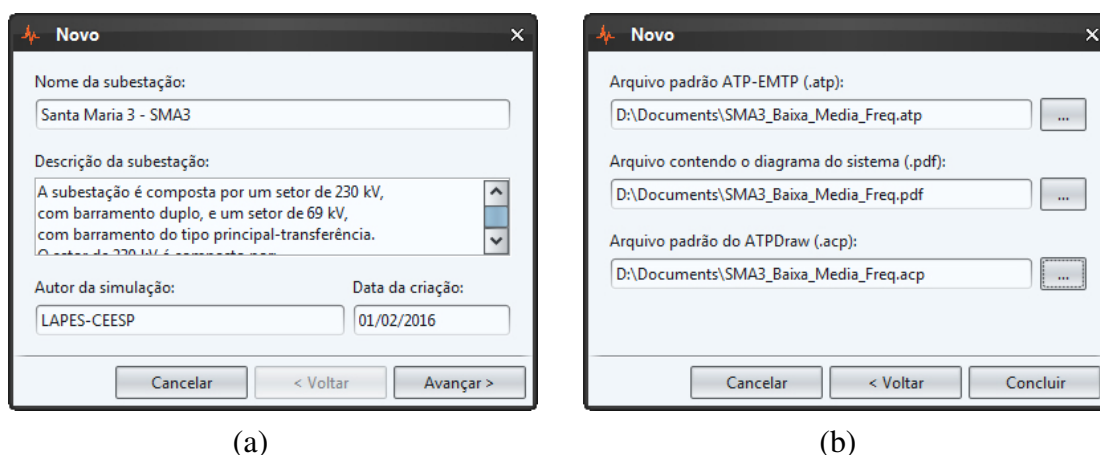
Fonte: Elaborado pelo autor.

De posse dos modelos da subestação a ser analisada, descreve-se na sequência deste capítulo os procedimentos para simulação e análise de transitórios no software desenvolvido. A primeira ação tomada com este intuito é a criação de um novo caso.

5.2 CRIAÇÃO DE UM NOVO CASO

Para realizar a simulação de uma subestação ainda não cadastrada no banco de dados do ATP-SA, primeiramente deve-se criar um novo caso “em branco”. Para isso, o usuário pode selecionar esta opção através do Menu Arquivo ou da Barra de Ferramentas do software utilizando o *mouse*. O mesmo pode ser realizado via teclado utilizando a sequência de teclas “Ctrl+N”. Após esta ação, a janela apresentada na Figura 5.2(a) será exibida.

Figura 5.2 – Criação de um novo caso no ATP-SA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode-se observar na Figura 5.2(a), os campos a serem informados pelo usuário correspondem a:

- Nome da subestação;
- Descrição da subestação (opcional);
- Autor da simulação;
- Data de criação.

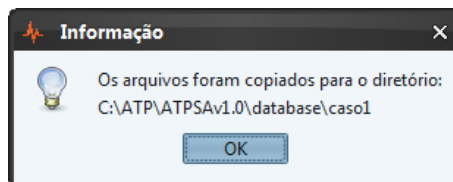
Após inserir os dados solicitados o usuário deve clicar em “Avançar”. Se algum campo obrigatório não for preenchido, o software exibirá uma mensagem de advertência e solicitará a informação. Caso contrário, a janela representada na Figura 5.2(b) será exibida para a vinculação dos seguintes arquivos:

- Arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP;
- Arquivo contendo o diagrama da subestação (opcional);
- Arquivo padrão do ATPDraw (opcional).

Ao clicar em “Concluir”, o software verificará a validade dos arquivos vinculados através de suas extensões. Caso alguma irregularidade seja constatada, uma mensagem de erro será exibida e o respectivo arquivo será solicitado novamente. Mesmo os arquivos considerados opcionais, se informados, serão verificados.

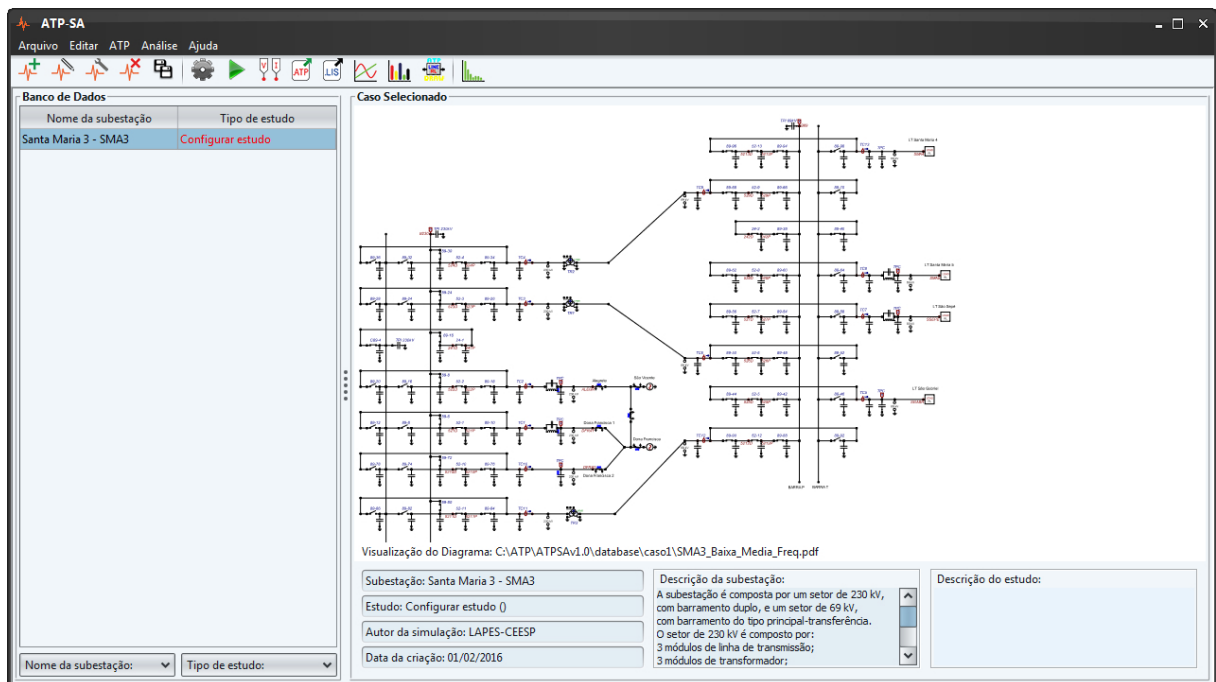
Se nenhum problema for detectado, a mensagem representada na Figura 5.3 será exibida, informando o diretório de destino dos arquivos do novo caso criado. Ao clicar em “OK”, os dados cadastrados serão exibidos na janela principal do software (Figura 5.4).

Figura 5.3 – Informação do diretório de destino dos arquivos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.4 – Informações do novo caso criado no ATP-SA.



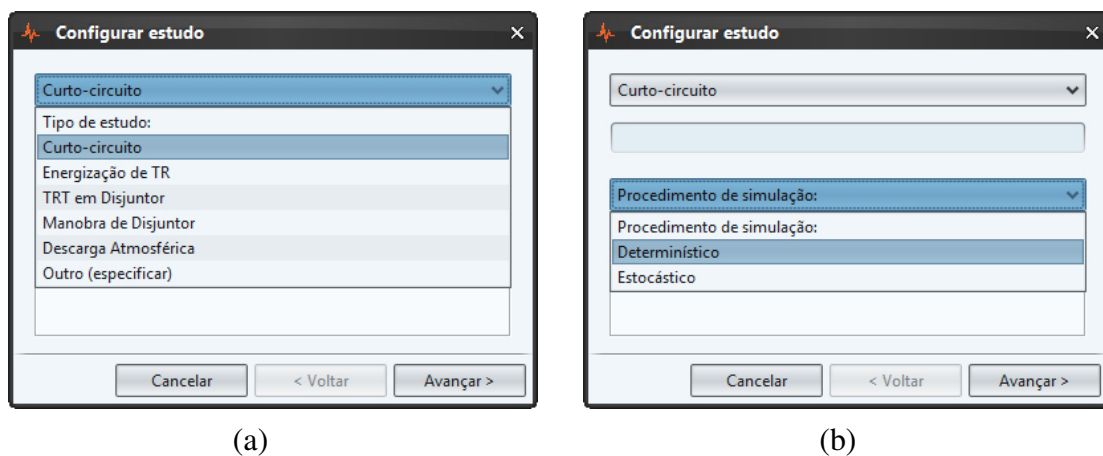
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a criação de um novo caso, o próximo passo a ser realizado é a configuração do estudo simulado. Enquanto esta operação não for efetuada, as demais funcionalidades do software ficarão bloqueadas (com exceção de editar e excluir caso). O primeiro procedimento desta ação, descrito na seção 5.3, consiste na definição do tipo e do procedimento de simulação.

5.3 SELEÇÃO DO TIPO DE ESTUDO E PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO

As figuras 5.5(a) e 5.5(b) representam a mesma janela de configuração do estudo a ser realizado no ATP-SA. No entanto, a primeira enfatiza a seleção do tipo de estudo, ao passo que a segunda destaca a definição do procedimento de simulação empregado. Para acessar esta janela, o usuário pode selecionar a opção correspondente no Menu Editar, na Barra de Ferramentas ou através da sequência de teclas “Ctrl+E”.

Figura 5.5 – Definição do tipo de estudo e procedimento de simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na caixa de combinação (*combo box*) exibida na Figura 5.5(a), o usuário pode selecionar um dos seguintes tipos de estudo:

- Curto-circuito;
- Energização de TR;
- TRT em Disjuntor;
- Manobra de Disjuntor;
- Descarga Atmosférica;
- Outro (especificar).

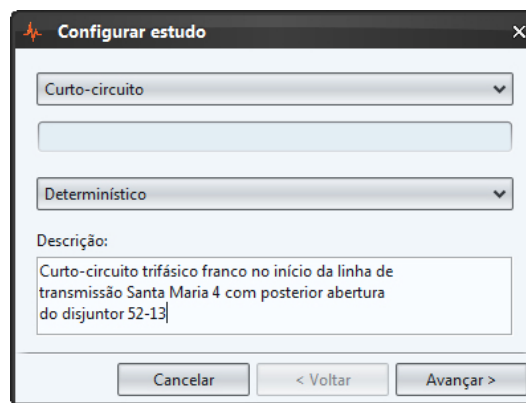
A opção “Outro” tipo de estudo foi adicionada posteriormente a modelagem das funcionalidades do software e, em vista disso, não foi mencionada no capítulo 4. Esta opção permite que o usuário usufrua de alguns recursos do ATP-SA, como edição de pontos de medição, configuração de parâmetros de simulação e gerenciamento de arquivos em banco de dados, para simular outros tipos de estudo não contemplados pelo software.

Para utilizar esta opção, o estudo analisado precisa ser previamente modelado no arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP, juntamente com a representação do sistema elétrico. Uma identificação do tipo de estudo realizado é requisitada pelo software para questões de gerenciamento e busca no banco de dados. Esta identificação deve ser informada em campo específico, habilitado abaixo da caixa de combinação “Tipo de estudo”.

Além do tipo de estudo, o usuário precisa informar o procedimento de simulação empregado: determinístico ou estocástico. Esta seleção deve ser realizada na caixa de combinação destacada na Figura 5.5(b). Para estudos de TRT em disjuntor, no entanto, esta opção é automaticamente definida pelo ATP-SA como determinístico, sem a possibilidade de alteração pelo usuário.

Uma descrição do estudo realizado também pode ser informada pelo usuário, mas este não é um campo obrigatório. Como exemplo, a Figura 5.6 apresenta a seleção do estudo de curto-circuito, procedimento de simulação determinístico, e uma breve descrição do mesmo.

Figura 5.6 – Seleção do estudo determinístico de curto-circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.6, ao clicar no botão “Avançar”, o software verificará o tipo e o procedimento de simulação selecionados e solicitará ao usuário os dados necessários à configuração do estudo. As seções de 5.4 a 5.8 apresentam um exemplo de simulação determinística e de simulação estocástica (com exceção da TRT) para cada tipo de estudo contemplado pelo ATP-SA.

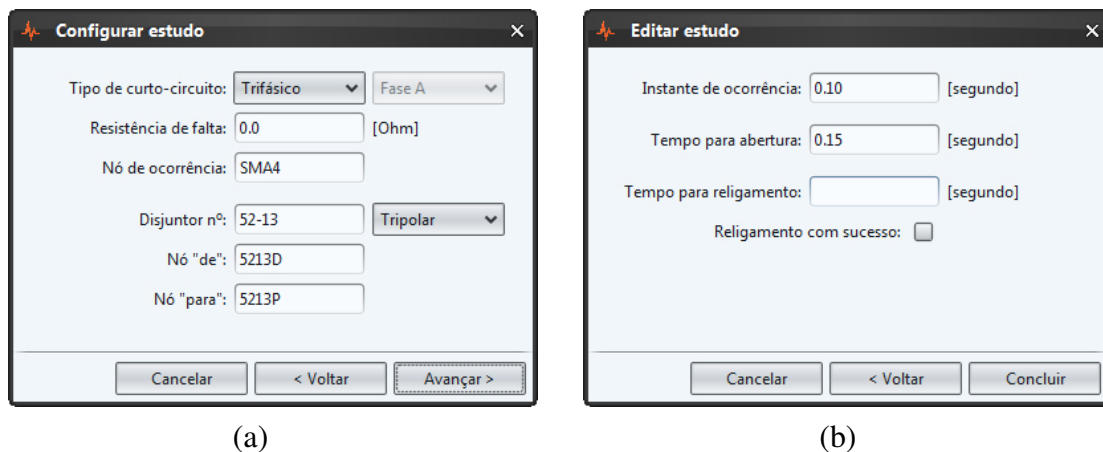
5.4 ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

Neste exemplo de aplicação, efetuou-se a simulação determinística e estocástica de um curto-circuito trifásico franco (impedância de falta nula) no início da linha de transmissão Santa Maria 4, com posterior abertura tripolar do disjuntor 52-13. A configuração e os resultados específicos de cada simulação são apresentados na sequência.

5.4.1 Simulação determinística

As Figuras 5.7(a) e 5.7(b) exibem as janelas específicas do ATP-SA para configuração do estudo de curto-circuito com simulação determinística. Os parâmetros utilizados na simulação realizada são apresentados na Tabela 5.1.

Figura 5.7 – Configuração do estudo determinístico de curto-circuito.



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados no estudo determinístico de curto-circuito.

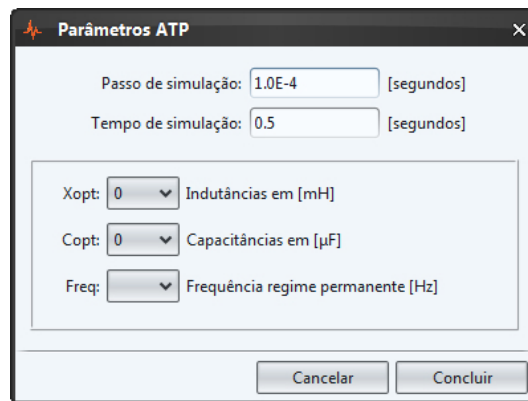
Parâmetro do estudo	Valor
Tipo de curto-circuito	Trifásico
Impedância de falta	0 Ω
“Nó” de ocorrência do curto-circuito	SMA4
Instante de ocorrência do curto-circuito	0,1 s
Número do disjuntor	52-13
“Nós” do disjuntor	5213D e 5213P
Tipo de abertura	Tripolar
Tempo para abertura após o curto-circuito	0,15 s
Tempo para religamento após a abertura	Sem religamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.8 apresenta a janela do ATP-SA para configuração dos parâmetros de simulação. Esta pode ser acessada através do Menu ATP, da Barra de Ferramentas ou da tecla “F3”. Conforme descrito no capítulo 4, o software predefine automaticamente estes parâmetros após a configuração do estudo realizado. Porém, o usuário pode alterá-los a seu critério através desta janela. No presente exemplo, os parâmetros utilizados foram:

- $dt = 1 \times 10^{-4}$ s;
- $Tmax = 0,5$ s;
- $Xopt = 0$;
- $Copt = 0$.

Figura 5.8 – Parâmetros de simulação utilizados no estudo determinístico de curto-circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a configuração do estudo realizado, a opção “Executar Simulação” ainda não estará disponível para o usuário. Para isso, deve-se previamente definir os pontos de medição das variáveis de interesse. As janelas apresentadas na Figura 5.9 destinam-se a realização deste procedimento. Para acessá-las, o usuário pode selecionar esta opção no Menu ATP ou na Barra de Ferramentas do software.

Quando esta ação é solicitada, o software efetua a leitura do arquivo padrão do ATP-EMTP, vinculado durante a criação do respectivo caso, e identifica pontos (“nós”) de medição de tensão e cartões “SWITCH” do tipo “MEASURING”, utilizados como *probes* de corrente. Estas medições são carregadas nas janelas “*probes* de medição existentes” (Figura 5.9(a) e Figura 5.9(c), respectivamente), onde o usuário pode selecioná-las a seu critério. Além destas, o usuário também pode definir novos pontos de medição de tensão e corrente através das janelas “novas *probes* de medição” (Figura 5.9(b) e Figura 5.9(d), respectivamente).

Figura 5.9 – Pontos de medição definidos no estudo determinístico de curto-circuito.

(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste exemplo de aplicação, os “nós” de medição de tensão foram selecionados junto ao ponto de instalação do TPI da Barra A de 230 kV, do TPI da Barra Principal de 69 kV e do TPC da linha de transmissão Santa Maria 4. Nos três pontos, somente a Fase A foi selecionada. Já para a medição de corrente, selecionou-se as três fases no ponto de instalação do TC da linha de transmissão Santa Maria 4.

Definidos os pontos de medição, a simulação do caso em estudo pode finalmente ser executada. Para acessar esta ação, o usuário pode utilizar o Menu ATP, a Barra de Ferramentas ou a tecla “F2”.

Propositadamente, para demonstrar uma ocorrência de erro de simulação, conectou-se duas *probes* de medição de corrente em paralelo. Conforme relatado anteriormente, estas *probes* são modeladas através de cartões “SWITCH” do tipo “MEASURING”. Quando chaves são conectadas entre os mesmos “nós”, o ATP-EMTP não consegue determinar as correntes na malha formada, provocando um erro na simulação.

Quando a simulação for concluída, o ATP-SA identificará a ocorrência do erro através do arquivo de saída. Neste arquivo, o software automaticamente destacará a mensagem informada pelo ATP-EMTP com o diagnóstico da possível causa do erro, exibindo-a para o usuário através da janela da Figura 5.10.

Figura 5.10 – Mensagem de erro de simulação informada pelo ATP-EMTP.



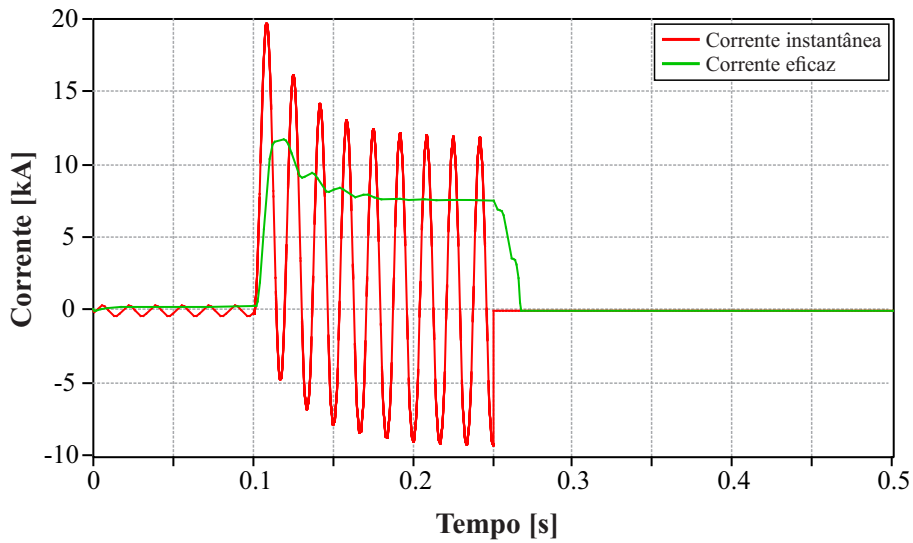
Fonte: Elaborado pelo autor.

Voltando ao exemplo abordado, após executar a simulação o usuário poderá analisar seus resultados. Como se trata de uma simulação determinística, o recurso oferecido para análise é a representação das variáveis de interesse no domínio do tempo através de gráficos cartesianos.

A Figura 5.11 exibe o gráfico da corrente medida junto a Fase A do primário do TC da linha de transmissão Santa Maria 4. Neste gráfico, pode-se verificar a corrente de carga do sistema até o instante de 0,1 s, onde observa-se o transitório ocasionado pelo curto-circuito trifásico. Já no instante 0,25 s, verifica-se o transitória da corrente gerado pela abertura tripolar do disjuntor 52-13.

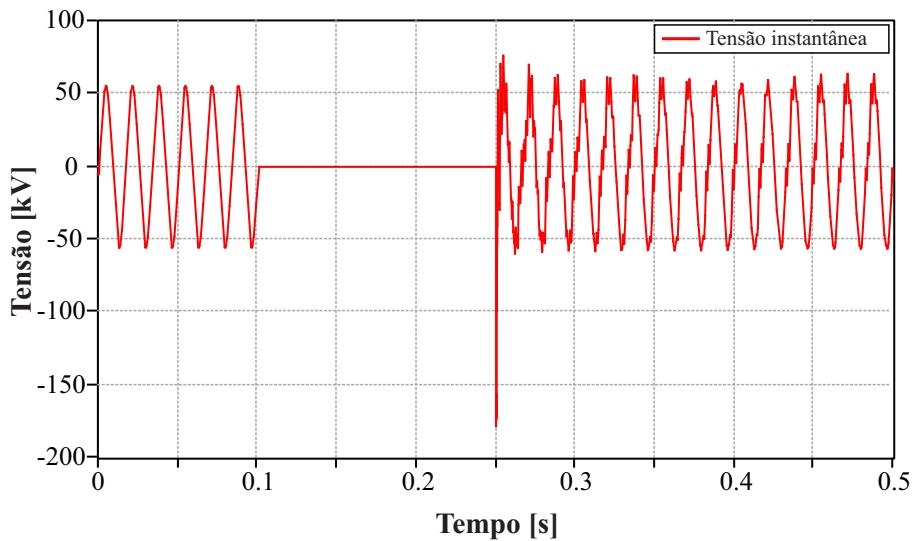
No mesmo período, verifica-se na Figura 5.12 o transitório da tensão medida no ponto de instalação do TPI da Barra Principal de 69 kV. Os valores representados neste gráfico correspondem a tensão fase-terra instantânea da Fase A.

Figura 5.11 – Corrente medida no TC da linha de transmissão Santa Maria 4 (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.12 – Tensão fase-terra medida no TPI da Barra Principal de 69 kV (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2 Simulação estocástica

Para a análise estocástica de transitórios ocasionados por curto-circuito, simulou-se neste exemplo de aplicação um total de cem eventos. Os parâmetros utilizados na configuração do estudo são apresentados na Tabela 5.2. Já os parâmetros de simulação utilizados foram:

- $dt = 1 \times 10^{-4}$ s;
- $T_{max} = 50,0$ s;
- $X_{opt} = 0$;
- $C_{opt} = 0$;

Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados no estudo estocástico de curto-circuito.

Parâmetro do estudo	Valor
Tipo de curto-circuito	Trifásico
Impedância de falta	0 Ω
“Nó” de ocorrência do curto-circuito	SMA4
Número de curtos-circuitos simulados	100
Tempo para início da análise após o curto-circuito	0,0 s
Número do disjuntor	52-13
“Nós” do disjuntor	5213D e 5213P
Tipo de abertura	Tripolar
Tempo para abertura após o curto-circuito	0,1 s
Tempo de dispersão entre polos do disjuntor	0,005 s
Valor inicial da sequência aleatória do MMC	97
“Nó” de medição de tensão e corrente	SMA4, Fase A
Tensão base do sistema	69 kV
Potência base do sistema	100 MVA

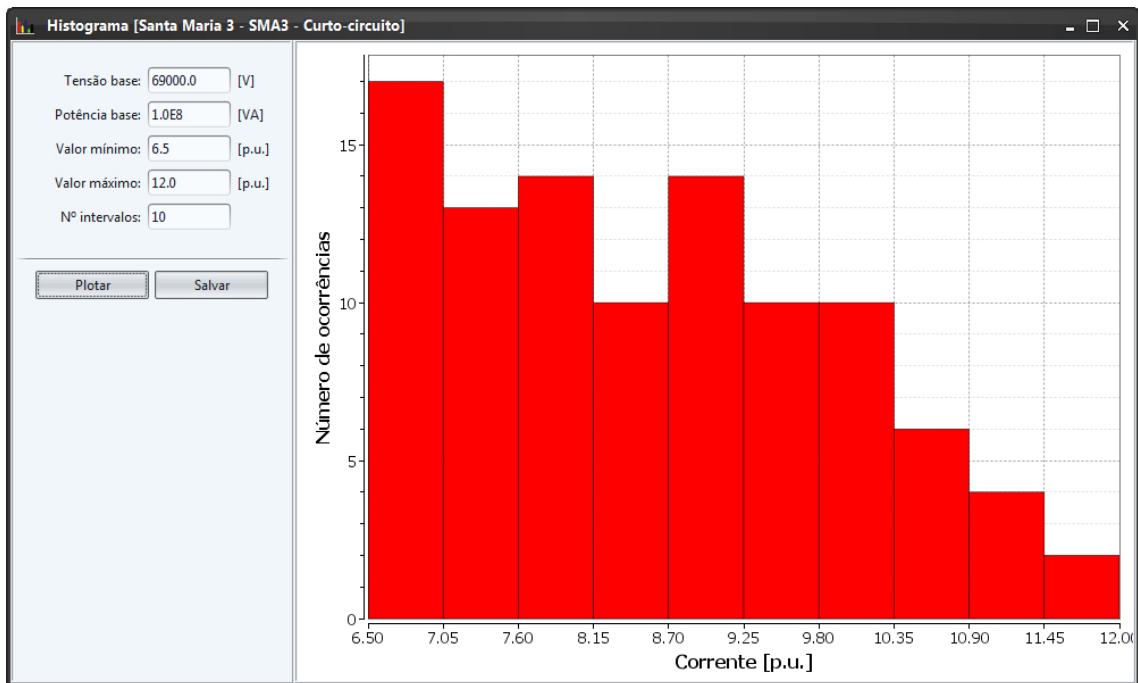
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.13 apresenta o histograma de frequências gerado pelo ATP-SA. Neste gráfico, exibe-se cem valores de corrente eficaz, medidos junto a Fase A do TC da linha de transmissão Santa Maria 4, divididos em dez intervalos. Estes valores foram calculados imediatamente após a ocorrência de cada um dos cem curtos-circuitos simulados.

Analisando-se a frequência dos intervalos do gráfico da Figura 5.13, verifica-se que 17% dos eventos simulados geram correntes entre 6,50 p.u. e 7,05 p.u.. No entanto, percebe-se também que há uma distribuição relativamente proporcional de ocorrências entre 6,50 p.u. e 10,35 p.u..

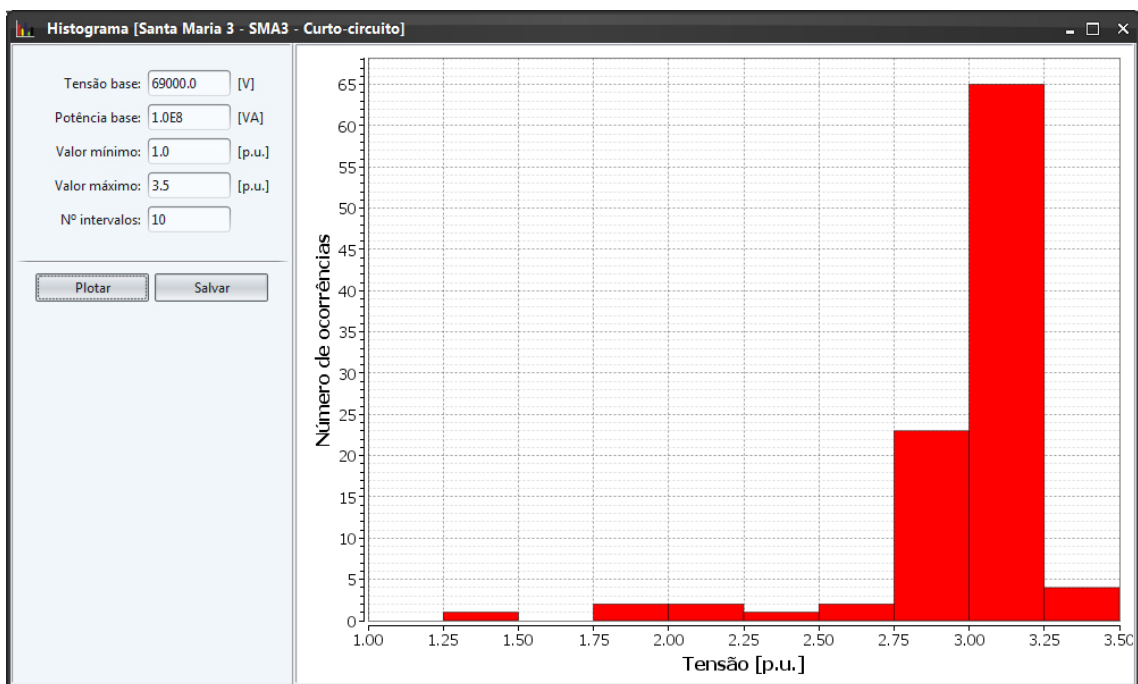
Já a Figura 5.14 demonstra o histograma de frequências para valores de tensão, medidos junto ao ponto de instalação do TPI da Barra Principal de 69 kV (Fase A). Através deste histograma, verifica-se que 65% das aberturas tripolares do disjuntor 52-13, em decorrência de curtos-circuitos trifásicos, geram tensões entre 3,00 p.u. e 3,25 pu..

Figura 5.13 – Histograma de frequências: corrente no TC da LT Santa Maria 4 (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

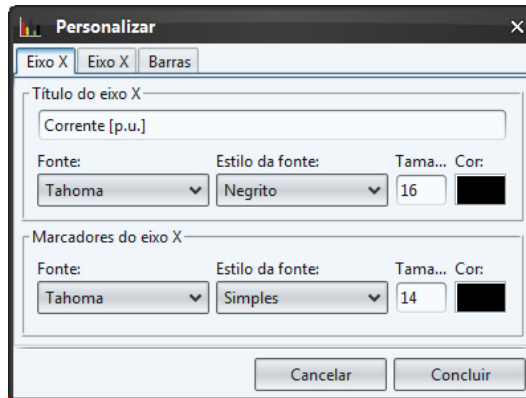
Figura 5.14 – Histograma de frequências: tensão no TPI da Barra Principal de 69 kV (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.15 exibe a janela desenvolvida para personalização dos histogramas gerados pelo ATP-SA. Esta janela possibilita ao usuário editar o título dos eixos do gráfico, trocar o tamanho, estilo e cor da fonte, alterar a cor de preenchimento e contorno das barras, entre outros recursos.

Figura 5.15 – Janela de personalização dos histogramas gerados pelo ATP-SA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 ESTUDO DE ENERGIZAÇÃO DE TR

Neste exemplo de aplicação, abordou-se a energização individual do transformador de potência TR-2 da subestação SMA3, a partir do disjuntor 52-4 (lado de 230 kV). Para que fosse possível analisar o comportamento da tensão na Barra Principal de 69 kV em virtude da energização deste transformador, o disjuntor responsável por conectá-lo ao setor de 69 kV foi previamente fechado no arquivo padrão de entrada do ATP-EMTP.

Neste arquivo, os disjuntores dos transformadores TR-1 e TR-5, bem como das linhas de 69 kV, foram configurados com o estado aberto. Os parâmetros de configuração e os resultados da simulação determinística e estocástica deste estudo são apresentados a seguir.

5.5.1 Simulação determinística

Os dados específicos para configuração do estudo abordado neste exemplo são apresentados na Tabela 5.3. Por questões de espaço, suprimiu-se as imagens das janelas de configuração deste e dos demais estudos apresentados na sequência deste capítulo. Para os parâmetros de simulação, utilizou-se os valores indicados pelo ATP-SA para este tipo de estudo:

- $dt = 6,510 \times 10^{-5}$ s;
- $T_{max} = 1,0$ s;
- $X_{opt} = 0$;
- $C_{opt} = 0$;

Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados no estudo determinístico de energização de TR.

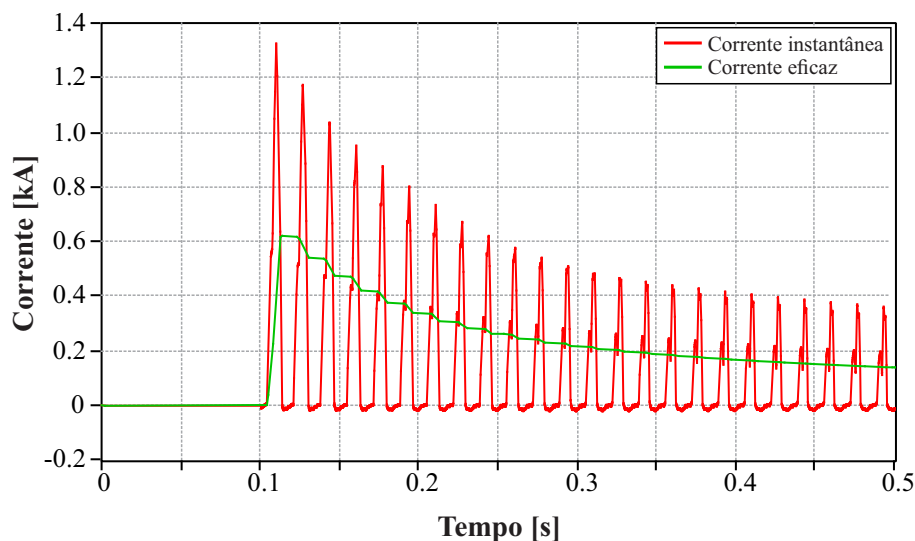
Parâmetro do estudo	Valor
Número do disjuntor	52-4
“Nós” do disjuntor	524D e 524P
Instante de fechamento do disjuntor	0,1 s
Tempo para início da análise	0,0 s
Tensão base do sistema	230 kV
Potência base do sistema	100 MVA
Frequência nominal do sistema	60 Hz

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.16 exibe o gráfico da corrente medida junto a Fase A do TC no módulo de 230 kV do transformador 2. Neste gráfico, pode-se verificar o transitório da corrente ocasionado pela energização do transformador em 0,1 s.

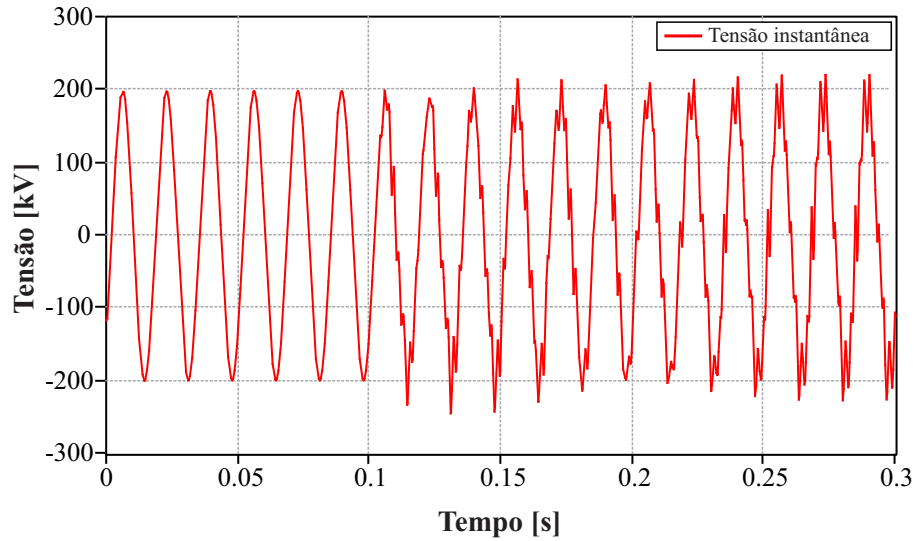
A partir do instante de energização do transformador 2, verifica-se na Figura 5.17 a ocorrência de transitório na tensão fase-terra da Fase A medida no ponto de instalação do TPI da Barra A de 230 kV. Já através da Figura 5.18, pode-se observar o transitório na tensão fase-terra da Barra Principal de 69 kV (Fase A).

Figura 5.16 – Corrente medida no TC no módulo de 230 kV do transformador 2 (Fase A).



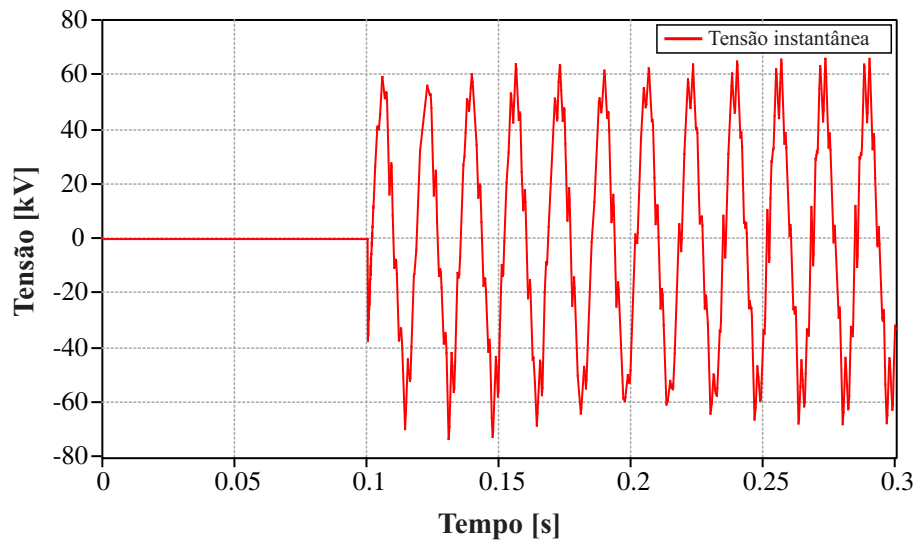
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.17 – Tensão fase-terra medida no TPI da Barra A de 230 kV (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.18 – Tensão fase-terra medida no TPI da Barra Principal de 69 kV (Fase A).



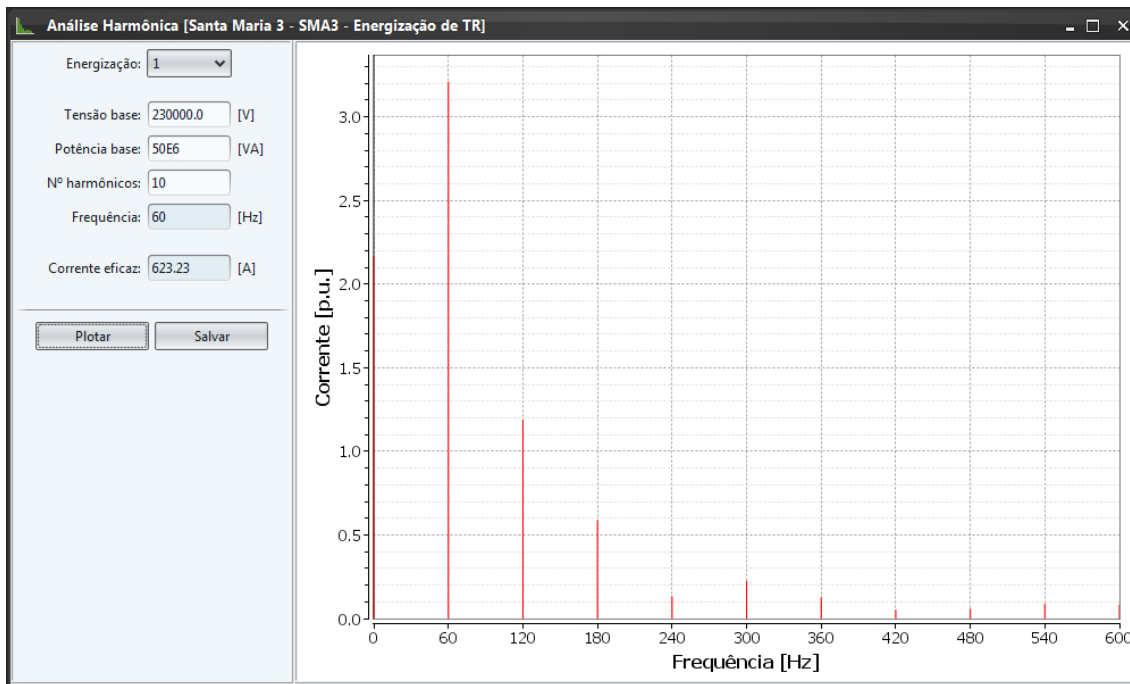
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os estudos de energização de transformador, o ATP-SA possibilita também a geração de um gráfico com a análise harmônica da corrente de energização. Para o caso analisado, este gráfico é apresentado na Figura 5.19.

Para avaliar a composição harmônica da corrente de energização em simulações determinísticas, o *foreign model* “INRUSH”, incorporado ao ATP-EMTP, emprega a Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform – DFT*). Esta transformada é aplicada em uma janela fixa de 512 pontos, iniciada a partir do “tempo de início da análise” informado pelo usuário na configuração do estudo.

Além da DFT, o *foreign model* “INRUSH” possui um algoritmo para cálculo do valor eficaz baseado no método de integração trapezoidal. Este é utilizado para determinar o valor eficaz da corrente de energização, calculado em um ciclo de frequência informada na configuração do estudo. O início do ciclo também é definido pelo usuário através do “tempo de início da análise”.

Figura 5.19 – Análise harmônica: corrente no TC do TR-2, lado de 230 kV (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do gráfico apresentado na Figura 5.19, pode-se verificar o valor eficaz dos dez primeiros harmônicos da frequência de 60 Hz. O segundo harmônico, por exemplo, apresenta um valor eficaz de aproximadamente 1,2 p.u. na base do transformador.

5.5.2 Simulação estocástica

Para a análise estocástica do estudo analisado, realizou-se a simulação de cem energizações do transformador 2. Os dados de parametrização do estudo são apresentados na Tabela 5.4. Para a configuração da simulação, utilizou-se os valores indicados pelo ATP-SA:

- $dt = 6,510 \times 10^{-5}$ s;
- $T_{max} = 100,0$ s;
- $X_{opt} = 0$;
- $C_{opt} = 0$.

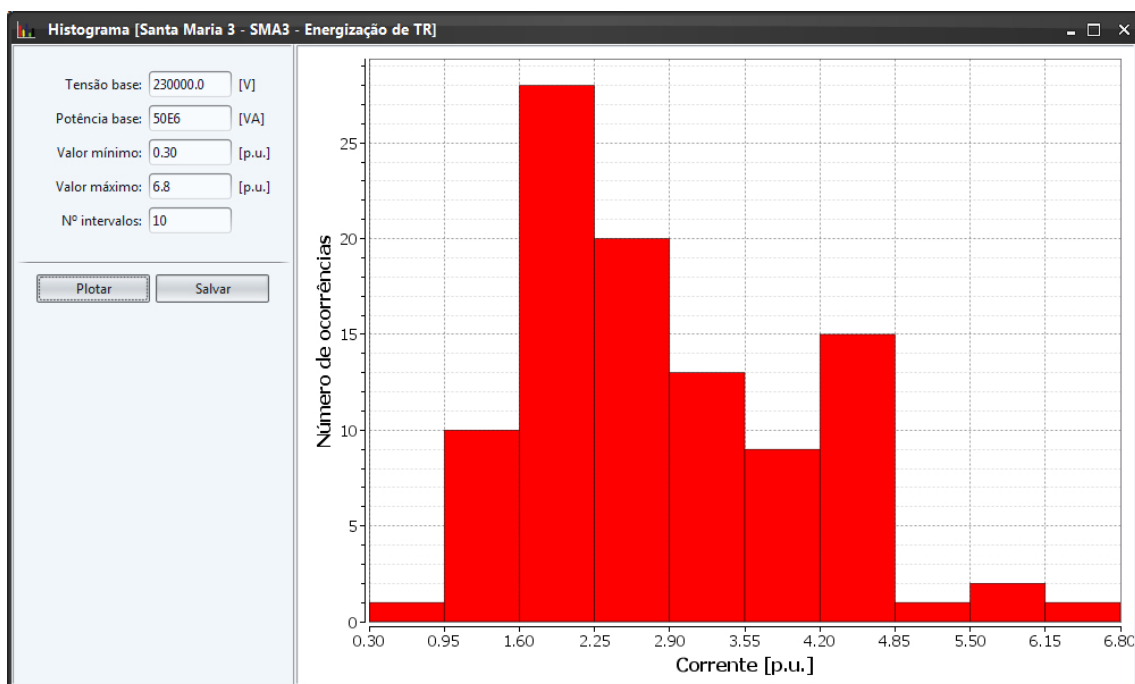
Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados no estudo estocástico de energização de TR.

Parâmetro do estudo	Valor
Número do disjuntor	52-4
“Nós” do disjuntor	524D e 524P
Tempo de dispersão entre polos do disjuntor	0,005 s
Tempo para início da análise	0,0 s
Número de energizações simuladas	100
Valor inicial da sequência aleatória do MMC	97
“Nó” de medição de corrente	TC4, Fase A
Tensão base do sistema	230 kV
Potência base do sistema	100 MVA
Frequência nominal do sistema	60 Hz

Fonte: Elaborado pelo autor.

O histograma exibido na Figura 5.20 apresenta os valores de corrente eficaz para as cem energizações simuladas, separados em dez intervalos. Através deste gráfico, verifica-se que os valores ficaram situados entre 0,30 p.u. e 6,80 p.u. na base nominal do transformador, e que 28% dos eventos geraram correntes entre 1,60 pu. e 2,25 p.u..

Figura 5.20 – Histograma de frequências: corrente no TC do TR-2, lado de 230 kV (Fase A).

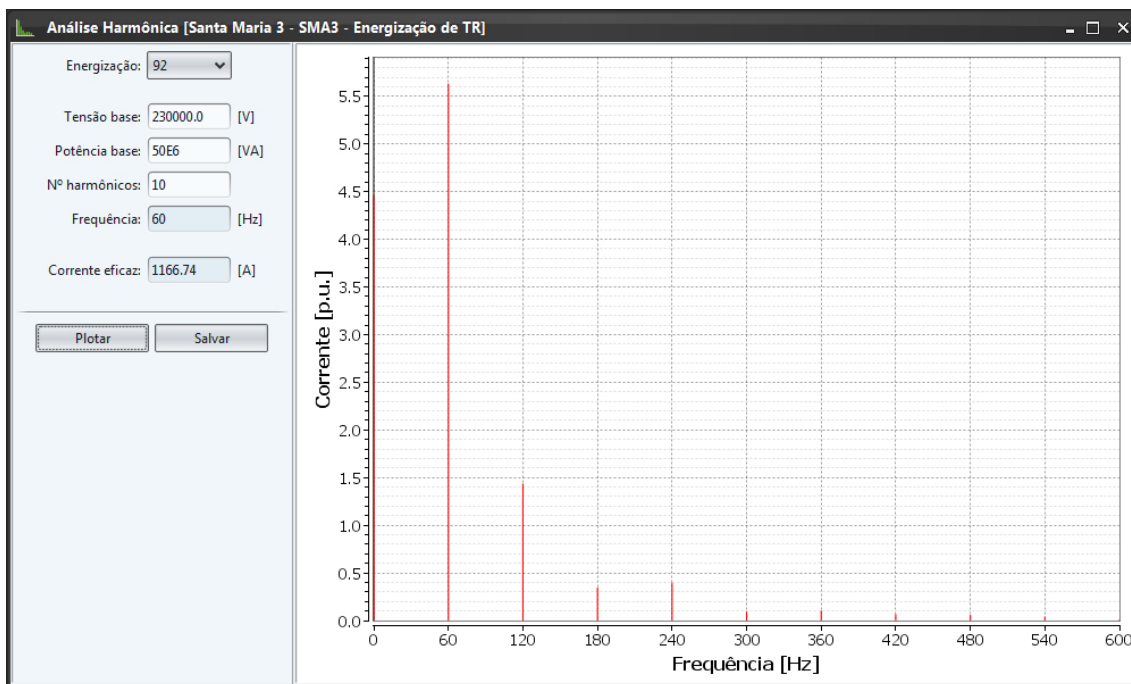


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.21 apresenta o gráfico com a análise harmônica da corrente da 92ª energização simulada. Esta foi automaticamente selecionada pelo ATP-SA por ser a energização que apresentou a maior corrente eficaz imediatamente após o fechamento do disjuntor. Estas informações são determinadas pelo software a partir de dados do *foreign model* “INRUSH”.

Através da caixa de combinação posicionada na porção superior esquerda da janela exibida na Figura 5.21, o usuário tem acesso a uma lista de todas as energizações realizadas na simulação. Desta forma, pode selecionar e analisar a de seu interesse.

Figura 5.21 – Análise harmônica: corrente no TC do TR-2, lado de 230 kV (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 ESTUDO DE TRT EM DISJUNTOR

Para demonstrar a aplicação do software desenvolvido em estudos de TRT em disjuntor, realizou-se a simulação de abertura tripolar do disjuntor 52-2, pertencente ao módulo da linha de transmissão Alegrete 2, em decorrência de um curto-circuito trifásico franco na chegada desta linha a subestação São Vicente. Os dados de configuração do presente estudo são apresentados na Tabela 5.5.

Conforme exposto no capítulo 4, a partir da tensão nominal do sistema no ponto de instalação do disjuntor analisado, o ATP-SA seleciona automaticamente valores típicos para modelá-lo. Os referidos valores foram compilados por Silva et al. (2015).

Tabela 5.5 – Parâmetros utilizados no estudo de TRT em disjuntor.

Parâmetro do estudo	Valor
Tipo de curto-circuito	Trifásico
“Nó” de ocorrência do curto-circuito	ALEGR
Instante de ocorrência do curto-circuito	0,0 s
Número do disjuntor	52-2
“Nós” do disjuntor	522D e 522P
Tipo de abertura	Tripolar
Tempo para abertura após o curto-circuito	0,1 s
Tensão nominal do sistema	230 kV

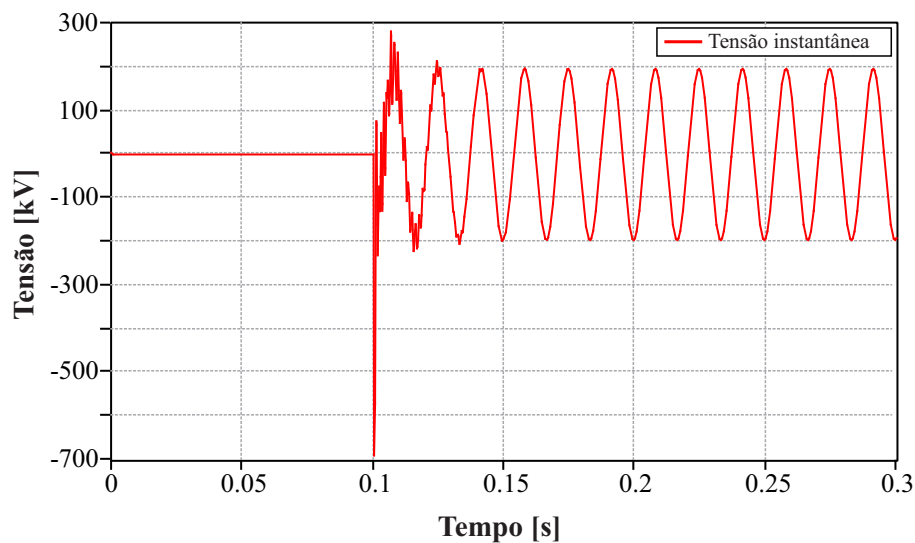
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a parametrização da simulação, utilizou-se os valores indicados pelo ATP-SA:

- $dt = 1 \times 10^{-5}$ s;
- $T_{max} = 0,5$ s;
- $X_{opt} = 0$;
- $C_{opt} = 0$.

A Figura 5.22 exibe o gráfico da tensão da Fase A medida entre os polos do disjuntor 52-2. A forma de onda apresentada após a abertura do disjuntor em 0,1 s pode ser utilizada para a determinação de parâmetros da TRT, como amplitude máxima e taxa de crescimento.

Figura 5.22 – Tensão medida entre os polos do disjuntor 52-2 (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 ESTUDO DE MANOBRAS DE DISJUNTOR

Os recursos oferecidos pelo ATP-SA para simulação de manobras visam possibilitar a análise de outros eventos que requeiram operação de disjuntor, diferentes dos já contemplados anteriormente. Em vista disso, abordou-se neste exemplo os eventos de energização e de desenergização de linha de transmissão.

Na subestação adotada como sistema base neste capítulo, selecionou-se a linha de transmissão Alegrete 2, manobrada a partir do disjuntor 52-2. Os parâmetros de configuração e os resultados da simulação determinística e estocástica deste exemplo de aplicação são apresentados a seguir.

5.7.1 Simulação determinística

Na simulação determinística deste exemplo de aplicação, configurou-se o disjuntor 52-2 com o estado inicial aberto e definiu-se duas operações: um fechamento para energização da linha de transmissão em 0,2 s e uma abertura para o desligamento da mesma em 0,4s. Os demais parâmetros de configuração deste estudo são apresentados na Tabela 5.6. Os parâmetros de simulação utilizados foram:

- $dt = 1 \times 10^{-5}$ s;
- $T_{max} = 0,5$ s;
- $X_{opt} = 0$;
- $C_{opt} = 0$.

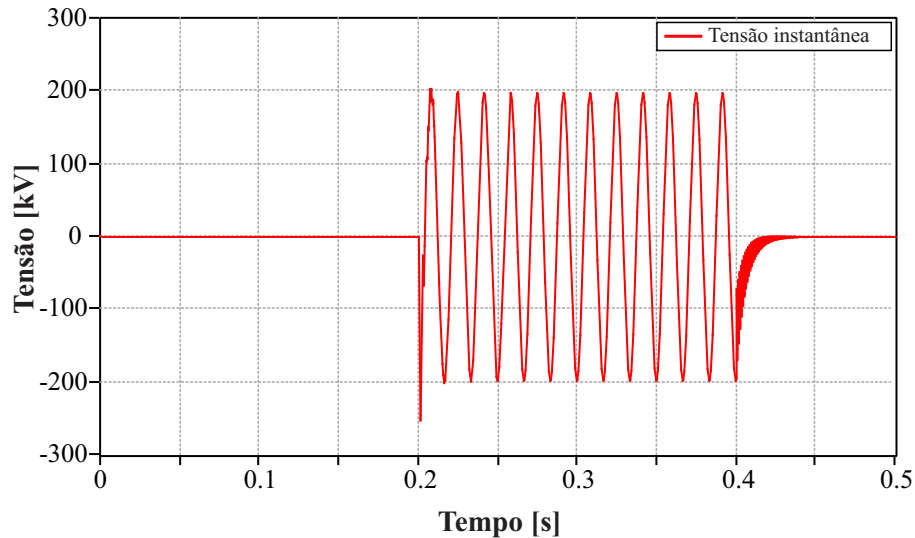
Tabela 5.6 – Parâmetros utilizados no estudo determinístico de manobras de disjuntor.

Parâmetro do estudo	Valor
Número do disjuntor	52-2
“Nós” do disjuntor	522D e 522P
Tipo de operação	Tripolar
Estado inicial do disjuntor	Aberto
Instante da 1ª operação: fechamento	0,2 s
Instante da 2ª operação: abertura	0,4 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.23 apresenta o gráfico da tensão fase-terra instantânea medida junto a Fase A do TPC da linha de transmissão Alegrete 2. Através deste gráfico, pode-se analisar os transitórios ocasionados pelas manobras de energização e de desenergização desta linha de transmissão.

Figura 5.23 – Tensão fase-terra medida no TPC da linha de transmissão Alegrete 2 (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7.2 Simulação estocástica

Para a análise estocástica, realizou-se a simulação de cem eventos, compreendendo cinquenta manobras de abertura e cinquenta de fechamento. Os demais valores utilizados para configurar este estudo em específico são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Parâmetros utilizados no estudo estocástica de manobras de disjuntor.

Parâmetro do estudo	Valor
Número do disjuntor	52-2
“Nós” do disjuntor	522D e 522P
Tipo de operação	Tripolar
Tempo de dispersão entre polos do disjuntor	0,005 s
Número total de manobras simuladas	100
Valor inicial da sequência aleatória do MMC	97
“Nó” de medição de tensão	ALEGR, Fase A
Tensão base do sistema	230 kV
Potência base do sistema	100 MVA

Fonte: Elaborado pelo autor.

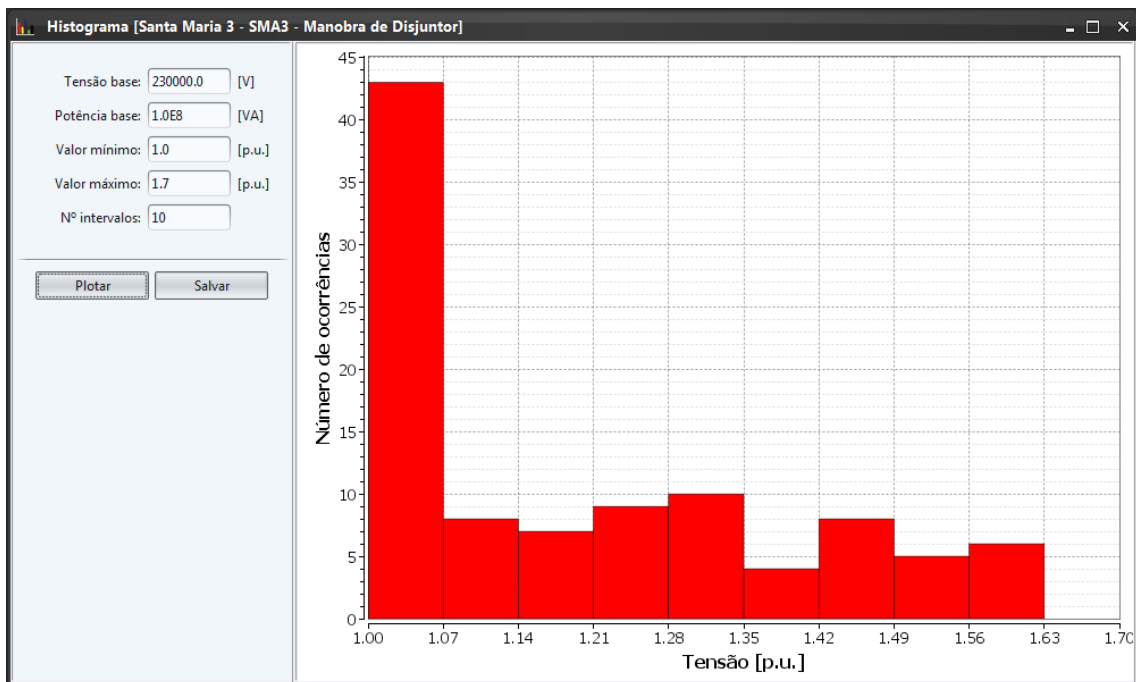
Conforme descrito no capítulo 4, para a predefinição do parâmetro T_{max} em simulações estocásticas, o ATP-SA multiplica automaticamente o valor recomendado na Tabela 4.2 pelo número total de eventos analisados. Desta forma, o valor recomendado para o presente estudo, juntamente com os demais parâmetros de simulação, corresponde:

- $dt = 1 \times 10^{-5}$ s;
- $T_{max} = 20,0$ s;
- $X_{opt} = 0$;
- $C_{opt} = 0$.

A Figura 5.24 apresenta o histograma de frequências gerado pelo ATP-SA para análise da simulação estocástica. Os dados apresentados neste gráfico correspondem a cem valores de tensão da Fase A no ponto de instalação do TPC da linha de transmissão Alegrete 2, medidos após a realização de cada manobra simulada.

A partir deste histograma, constata-se que 44% dos eventos geram tensões entre 1,00 p.u. e 1,07 p.u.. Verifica-se também que os demais eventos apresentam uma distribuição proporcional de ocorrências entre 1,07 p.u. e 1,63 p.u..

Figura 5.24 – Histograma de frequências: tensão no TPC da LT Alegrete 2 (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, a partir do resultado da simulação determinística deste mesmo caso, apresentado no gráfico da Figura 5.23, pode-se verificar no comportamento da tensão no domínio do tempo que a manobra de desenergização da linha de transmissão praticamente não ocasiona sobretensão. Esta informação pode justificar o fato de 44% dos eventos analisados na simulação estocástica gerarem tensões entre 1,00 p.u. e 1,07 p.u., visto que cinquenta destes eventos correspondem a este tipo de manobra.

5.8 ESTUDO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Como eventos de descarga atmosférica geram transitórios de altas frequência, na etapa de criação de um novo caso no ATP-SA para análise deste fenômeno, deve-se vincular um modelo do sistema compatível com esta faixa de frequências. No presente exemplo de aplicação, utilizou-se o modelo para altas frequências da subestação SMA3.

Convém destacar que no referido modelo utilizado, não foram representados os cabos de guarda da subestação. No entanto, sabe-se que o raio da esfera de proteção destes cabos é proporcional a amplitude da corrente de descarga atmosférica, de modo que correntes de amplitude maiores tem menor probabilidade de atingirem diretamente os condutores das fases do sistema. Desta forma, mesmo que os cabos de guarda não sejam modelados, pode-se realizar simulações representativas de descargas diretas reduzindo o valor de sua corrente máxima.

O ponto da subestação escolhido para simulação das descargas atmosféricas diretas, corresponde ao trecho de interligação do transformador TR-1 com o setor de 69 kV. Os parâmetros específicos e os resultados da simulação determinística e estocástica são apresentados a seguir.

5.8.1 Simulação determinística

Os dados utilizados para a configuração da simulação determinística deste exemplo são apresentados na Tabela 5.8. Os parâmetros de simulação utilizados foram:

- $dt = 1 \times 10^{-7}$ s;
- $T_{max} = 0,05$ s;
- $X_{opt} = 0$;
- $C_{opt} = 0$.

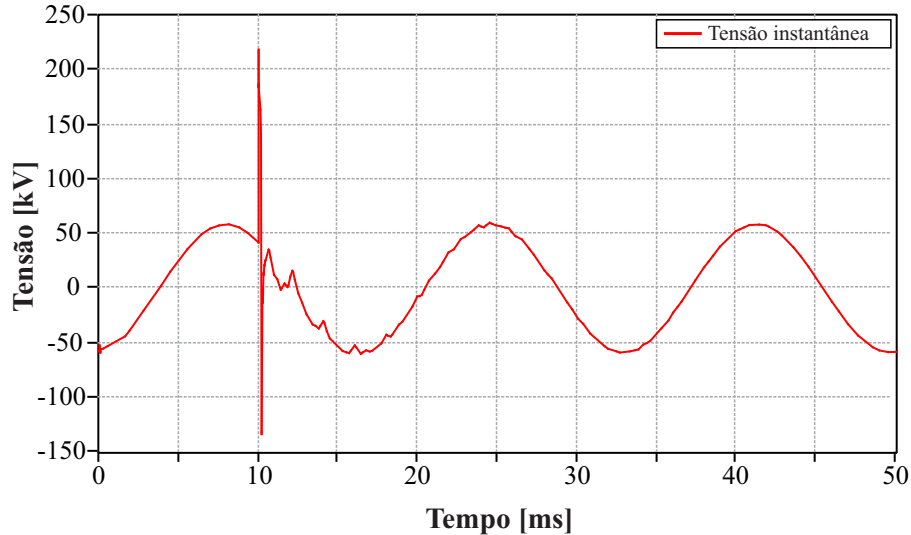
Tabela 5.8 – Parâmetros utilizados no estudo determinístico de descargas atmosféricas.

Parâmetro do estudo	Valor
“Nó” de incidência da descarga	DFRA1, Fase A
Instante de incidência da descarga	0,01 s
Impedância de surto do sistema	300 Ω
Forma de onda da corrente	Heidler, n = 2
Corrente máxima	$31,1 \times 10^3$ A
Tempo de frente da onda	$3,83 \times 10^{-6}$ s
Tempo de cauda da onda	$77,5 \times 10^{-6}$ s

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.25 apresenta a tensão fase-terra instantânea medida junto a Fase A do TPI da Barra Principal de 69 kV. Através deste gráfico, pode-se verificar o transitório ocasionado na tensão devido a incidência de uma descarga atmosférica direta em 0,01 s. Os parâmetros da descarga simulada também são apresentados na Tabela 5.8.

Figura 5.25 – Tensão fase-terra medida no TPI da Barra Principal de 69 kV (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.8.2 Simulação estocástica

Para a análise estocástica, simulou-se um total de cem descargas atmosféricas com os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 5.9. Os demais dados de configuração do estudo também são apresentados nesta tabela. Para os parâmetros de simulação, utilizou-se os recomendados pelo ATP-SA:

- $dt = 1 \times 10^{-7}$ s;
- $T_{max} = 3,0$ s;
- $X_{opt} = 0$;
- $C_{opt} = 0$.

Tabela 5.9 – Parâmetros utilizados no estudo estocástico de descargas atmosféricas.

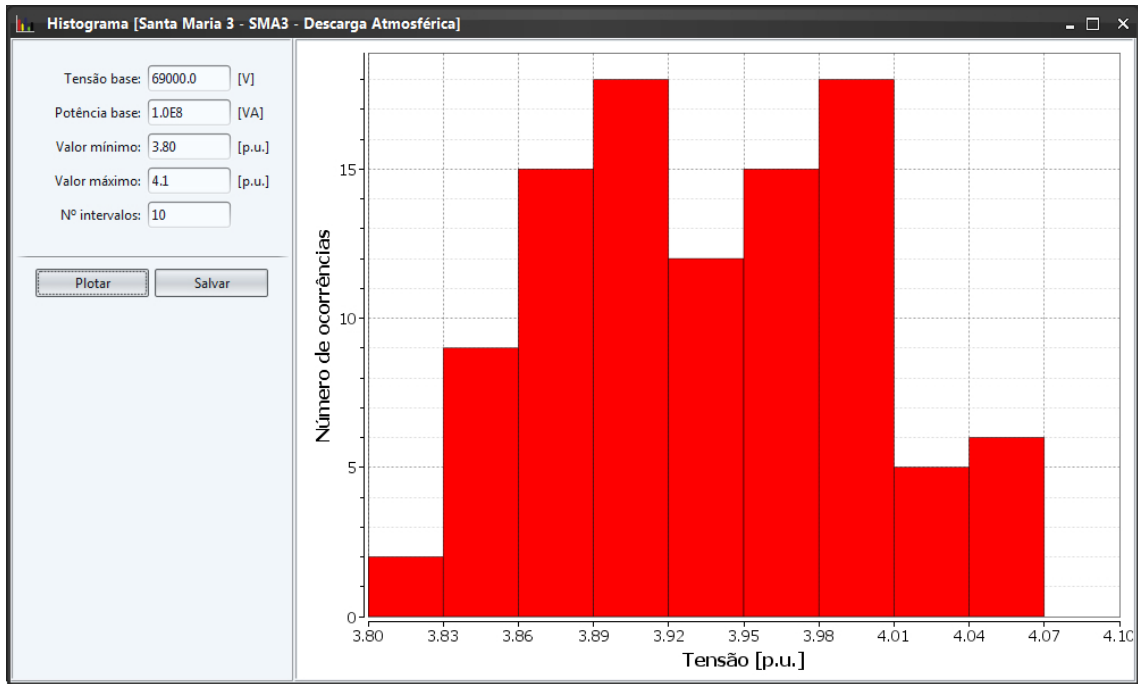
Parâmetro do estudo	Valor
“Nó” de incidência da descarga	DFRA1, Fase A
Impedância de surto do sistema	300 Ω
Forma de onda da corrente	Heidler, n = 2
Corrente máxima (mediana)	$10,1 \times 10^3$ A
Corrente máxima (desvio padrão)	$0,161 \times 10^3$ A
Tempo de frente da onda (mediana)	$3,83 \times 10^{-6}$ s
Tempo de frente da onda (desvio padrão)	$0,553 \times 10^{-6}$ s
Tempo de cauda da onda (mediana)	$77,5 \times 10^{-6}$ s
Tempo de cauda da onda (desvio padrão)	$0,577 \times 10^{-6}$ s
Número de descargas atmosféricas simuladas	100
“Nó” de medição de tensão	B69, Fase A
Tensão base do sistema	69 kV
Potência base do sistema	100 MVA

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.26 apresenta o histograma de frequências dos cem eventos simulados. A variável analisada neste estudo é a tensão da Fase A do sistema, medida junto ao ponto de instalação do TPI da Barra Principal de 69 kV.

Através deste histograma, verifica-se que as descargas atmosféricas simuladas geraram tensões entre 3,80 p.u. e 4,07 p.u.. No entanto, a maior parcela dos eventos, cerca de 78%, ocasionam tensões entre 3,86 p.u. e 4,01 p.u..

Figura 5.26 – Histograma de frequências: tensão no TPI da Barra Principal de 69 kV (Fase A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

Embora a etapa de verificação do software desenvolvido não tenha sido formalmente apresentada, pode-se constatar na demonstração dos exemplos de aplicação abordados no capítulo 5 que todos os requisitos funcionais especificados inicialmente foram atendidos. Através destes exemplos, pode-se identificar também algumas vantagens substanciais do ATP-SA em relação ao ATPDraw, o pré-processador gráfico para o ATP-EMTP mais utilizado atualmente. O Quadro 6.1 apresenta um comparativo entre estes dois softwares no desempenho destas atividades, utilizando os recursos já disponibilizados pelos mesmos sem a intervenção do usuário.

Quadro 6.1 – Comparativo de recursos disponibilizados pelo ATP-SA e o ATPDraw.

ATP-SA	ATPDraw
1) Representação de eventos precursores de transitórios eletromagnéticos:	
Possui recursos específicos para a simulação de curtos-circuitos, energização de transformador, TRT em disjuntor, manobras de disjuntor e descargas atmosféricas.	Oferece recursos básicos para a modelagem de alguns eventos, tais como chaves ideais para simulações de manobra e fontes para representação de descargas atmosféricas.
2) Simulação de eventos de forma estocástica:	
Permite a simulação estocástica dos eventos contemplados, com exceção da TRT.	Possui apenas o recurso da chave estatística (<i>Statistic Switch</i>).
3) Gerenciamento de arquivos de simulações	
Organiza as simulações através de um banco de dados, com os recursos de busca, inclusão, edição e exclusão.	Não comporta.
4) Predefinição de parâmetros de simulação:	
Recomenda valores compatíveis com o fenômeno analisado.	Predefine os mesmos valores independentemente do fenômeno analisado.
5) Suporte à análise de resultados de simulações determinísticas:	
Utiliza o software PlotXY para a geração de gráficos das variáveis de interesse no domínio do tempo.	Utiliza o software PlotXY para a geração de gráficos das variáveis de interesse no domínio do tempo.
6) Suporte à análise de resultados de simulações estocásticas:	
Possibilita a geração de histogramas de frequências das variáveis de interesse.	Não comporta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, tem-se conhecimento de que a capacidade de personalização oferecida pelo ATPDraw permite que o usuário possa implementar grande parte das funcionalidades listadas no Quadro 6.1. Porém, a dificuldade e o tempo demandado para a realização destas implementações pode inviabilizar sua realização por determinados grupos de usuários do ATP-EMTP, principalmente fora do âmbito acadêmico.

Da mesma forma, tem-se compreensão das limitações do software desenvolvido. Por ser uma ferramenta projetada para uma aplicação específica, suas utilizações são restritas. Além disso, o software não permite a incorporação de novas funcionalidades pelo usuário, o que limita a personalização dos estudos realizados apenas a alteração de parâmetros.

Neste contexto, não avalia-se o software desenvolvido como um substituto ao ATPDraw, mas sim como um complemento a suas limitações funcionais. Espera-se que seus recursos e ferramentas incorporadas auxiliem a realização de simulações e análises específicas de transitórios eletromagnéticos em subestações.

6.1 CONTINUIDADE DO TRABALHO

Algumas importantes funcionalidades não especificadas na etapa de definição dos recursos oferecidos pelo software foram identificadas durante a fase de implementação. Uma destas funcionalidades diz respeito a criação de uma lista de execução de simulações.

Como o ATP-SA gerencia os arquivos de entrada e saída do ATP-EMTP, realizando funções como verificação de erro de simulação, exclusão de arquivos auxiliares criados pelo programa, entre outras, optou-se por impedir a execução simultânea de simulações. Além disso, as ferramentas incorporadas ao ATP-EMTP pela equipe do LAPES-CEESP não comportam simulações estocásticas concomitantes.

Desta forma, o usuário precisa aguardar o término de uma simulação para iniciar a execução de outra. Como sistemas complexos demandam um tempo relativamente grande para simulação, o usuário acaba ficando ocioso enquanto monitora o término da execução.

Em continuidade ao desenvolvimento do software, pretende-se automatizar este processo criando uma “lista de espera” de simulações. Assim, o usuário poderá selecionar no banco de dados os casos que deseja simular e o software se encarregará de executá-las em sequência.

6.2 PUBLICAÇÕES

Durante o desenvolvimento do software apresentado, realizou-se a publicação de trabalhos em dois eventos da área de sistemas de potência. Estas publicações são descritas a seguir:

1. Título: ATP Substation Analysis: graphical preprocessor software for transient analysis in substations.

Autores: MARCHESAN, A. C.; MARIOTTO, L.; LOOSE, F.; ALVES F^o, P. F.; CARDOSO JR., G.; CAMARGO, M. C.

Evento: 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC).

Local: Stoke On Trent – UK.

Data: Setembro, 2015.

ISBN/ISSN: 9781467396820.

DOI: 10.1109/UPEC.2015.7339783.

Referência: Marchesan et al. (2015b).

2. Título: Desenvolvimento de um software pré-processador gráfico para análise estocástica de transitórios eletromagnéticos em subestações.

Autores: MARCHESAN, A. C.; KRAULICH, L., MARIOTTO, L.; CARDOSO JR., G.; LOOSE, F.; ALVES F^o, P. F.

Evento: XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE).

Local: São José dos Campos.

Data: Novembro, 2015.

Referência: Marchesan et al. (2015a).

REFERÊNCIAS

- Alternative Transients Program – Rule Book. Canadian/American EMTP User Group, 1987–1998.
- ANDERSON, A.; J.ERIKSSON, A. A summary of lightning parameters for engineering application. **International Conference on Large High Voltage Electric Systems**, 1980.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia**. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6939**: Coordenação de isolamento – procedimento. Rio de Janeiro, 2000. 15 p.
- BERGER, K. et al. Parameters of lightning flashes. **Electra**, p. 23–37, 1975.
- CAMM, E.; NATARAJAN, R.; MARTINEZ, J. A. Comparison of statistical switching results using gaussian, uniform and systematic switching approaches. **IEEE Transactions on Power Delivery**, abr. 2000.
- CHOWDHURI, P. et al. Parameters of lightning strokes: a review. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 1, p. 346–358, jan. 2005. ISSN 0885-8977.
- Companhia Estadual de Energia Elétrica – Geração e Transmissão. **Diagrama de operação: Subestação Santa Maria 3**. [S.l.], 2014.
- CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES. **Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines**. Paris – FR, 1991. 64 p.
- CVETIC, J. M.; STANIC, B. V.; HEIDLER, F. Calculation of lightning current parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, abr. 1999.
- D’AJUZ, A. et al. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Universitária Universidade Federal Fluminense, 1987. 425 p.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Pas88, n. 4, p. 388–399, abr. 1969.
- Electric Power Research Institute, EMTP Development Coordination Group. **Electromagnetic Transients Program (EMTP) – Workbook**. Palo Alto – US, 1986.
- Free Software Foundation. **GNU Lesser General Public License**: versão 2.1. Boston – US, 1999. Disponível em: <<http://www.gnu.org/licenses/old-licenses/lgpl-2.1.html>>. Acesso em: 23 jan. 2016.
- GILBERT, D. **JFreeChart**: a free 100% Java chart library. 2014. Disponível em: <<http://www.jfree.org/jfreechart>>. Acesso em: 18 set. 2014.
- GROUCHNIKOV, K. **Substance**: Java Swing look & feel library. 2010. Disponível em: <<https://github.com/kirill-grouchnikov/substance>>. Acesso em: 25 jun. 2014.

HEIDLER, F. et al. Parameters of lightning current given in IEC 62305: Background experience and outlook. **International conference on lightning protection**, Uppsala – SE, v. 29, jun. 2008.

HOIDALEN, H. K. ATPDraw for Windows Ver. 1.1. **EEUG News**, v. 3, n. 2, p. 18–23, maio 1997.

HOIDALEN, H. K. **ATPDraw – The graphical preprocessor to ATP**. Norway, 2016. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net>>. Acesso em: 11 jan. 2016.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC TR 60071-4, Insulation co-ordination – Part 4: computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks**. [S.l.], 2004. 122 p.

KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. Florianópolis: Ed. Pallotti, 2010.

KRÄULICH, L. et al. Stochastic analysis of transient overvoltages at substations by applying the Monte Carlo method integrated with ATP. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, 11., 2015, Cavtat – HR. **Anais eletrônicos...** Cavtat – HR: University of Zagreb, 2015. Disponível em: <http://www.ipst2015.com/openconf/modules/request.php?module=oc_proceedings&action=summary.php&id=152&a=Accept>. Acesso em: 10 nov. 2015.

Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos, Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência. **Relatório final**: projeto de P&D CEEE-GT 9947883. Santa Maria, 2016.

MARCHESAN, A. C. et al. Desenvolvimento de um software pré-processador gráfico para análise estocástica de transitórios eletromagnéticos em subestações. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 11., 2015, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: UNESP, 2015.

MARCHESAN, A. C. et al. ATP Substation Analysis: graphical preprocessor software for transient analysis in substations. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC), 50th., 2015, Stoke On Trent – UK. **Anais...** Stoke On Trent – UK: IEEE, 2015. p. 1–6.

MEYER, W. S.; LIU, T. huei. The birth and evolution of ATP and LEC. **Can/Am EMTP News**, v. 88-1, p. 4–5, set. 1988.

NUNES, R. R. **Coordenação de isolamento para transitórios de manobra considerando a forma de onda das sobretensões**. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

Oracle Corporation. **Java Platform, Standard Edition**: Downloads. 2016. Disponível em: <<http://www.oracle.com/technetwork/pt/java/javase/overview/index.html>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

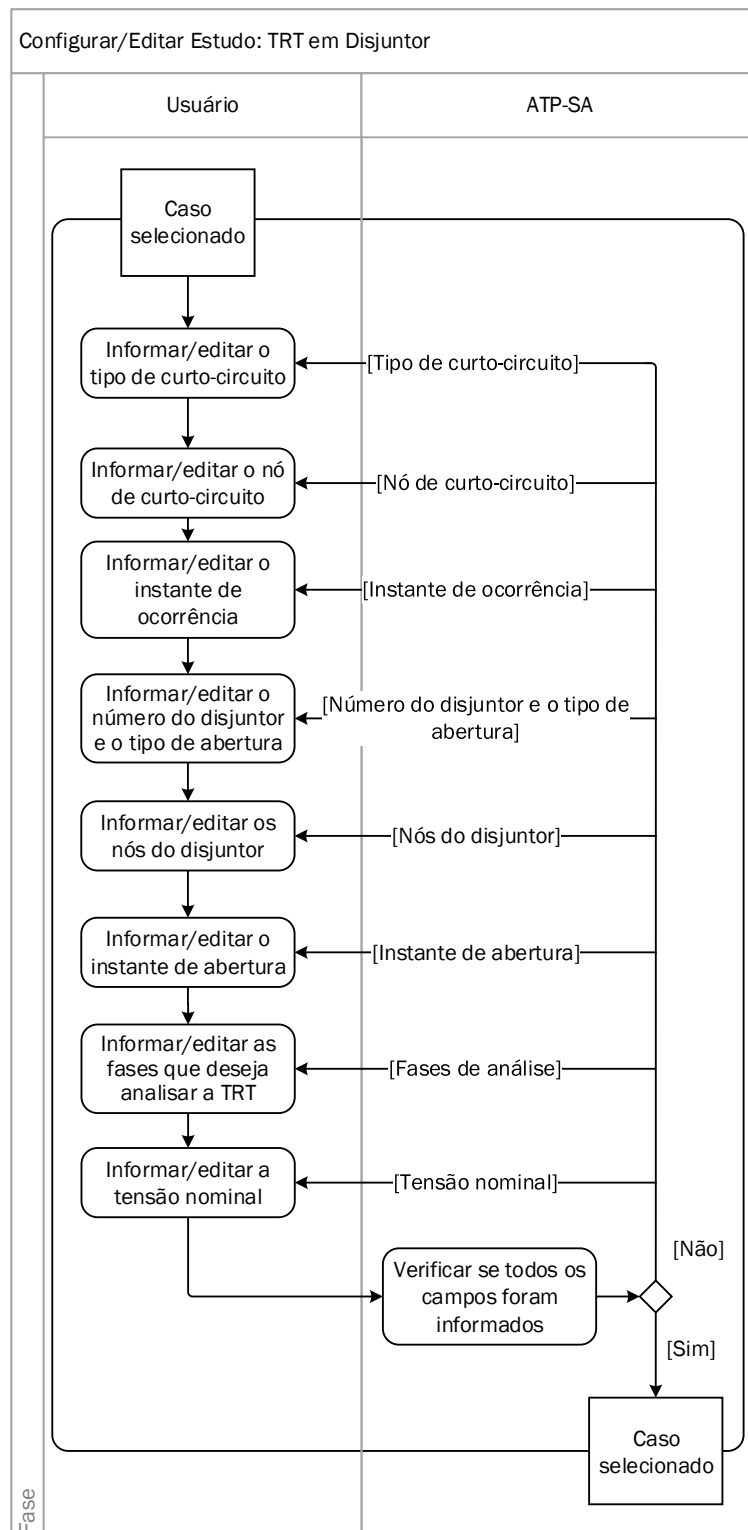
Power Engs. **ATPDesigner – Design and simulation of electrical power networks**. 2016. Disponível em: <<http://www.atpdesigner.de>>. Acesso em: 11 jan. 2016.

PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K. ATPDraw for Windows – User’s Manual. **EEUG News**, v. 4, n. 3-4, p. 25–32, ago. 1998.

- SILVA, C. D. L. da et al. Método baseado no domínio da frequência para estimar a tensão de restabelecimento transitória em disjuntores de alta tensão. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 11., 2015, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: UNESP, 2015.
- SONDERMANN, K. **PDFrenderer**: Java library for rendering PDF documents to the screen using Java2D. 2011. Disponível em: <<https://github.com/katjas/PDFrenderer>>. Acesso em: 14 out. 2014.
- TASCHINI, A.; CLERICI, A. Influence of switching surges of the switched line zero sequence impedance. **Transmission and distribution Committee of the IEEE**, v. 70, abr. 1970.
- VISACRO, S. F. **Descargas Atmosféricas uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Editora Altliber, 2005. 268 p.
- WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. **Electrical transmission and distribution reference book**. 4. ed. Pensilvânia – US: Westinghouse Electric Corp., 1950. 824 p.
- ZANETTA, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 712 p.

APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE SUBATIVIDADES

Figura A.1 – Diagrama de Subatividade: Configurar/Editar Estudo de TRT em Disjuntor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.2 – Diagrama de Subatividade: Configurar/Editar Estudo de Curto-circuito.

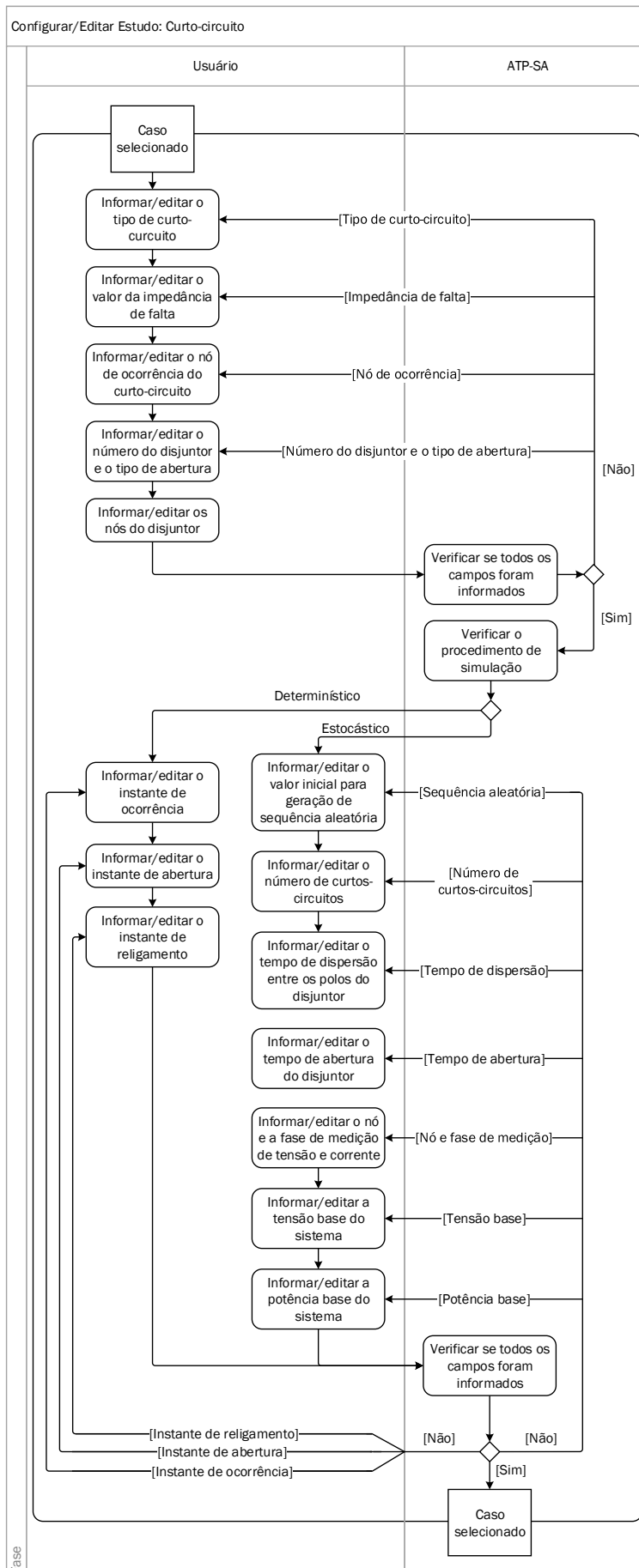


Figura A.3 – Diagrama de Subatividade: Configurar/Editar Estudo de Energização de TR.

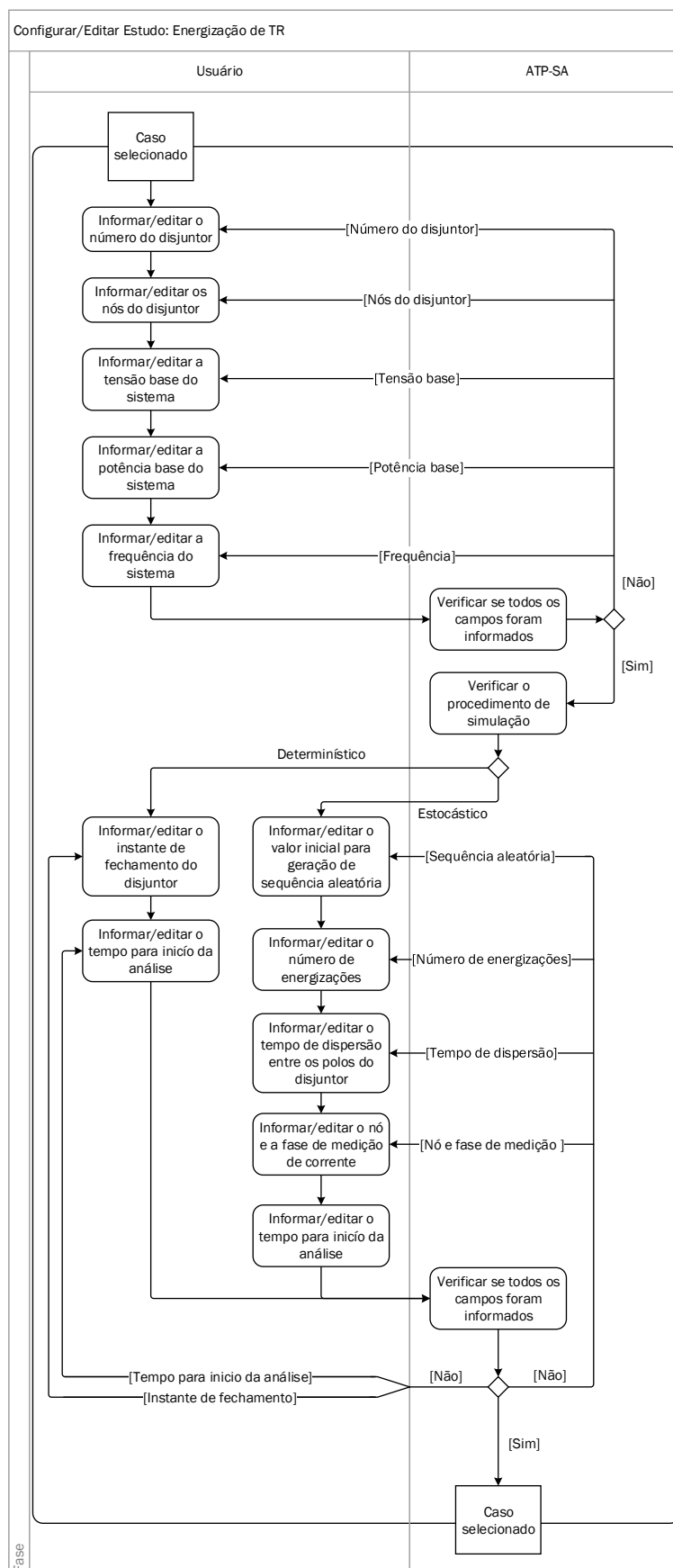
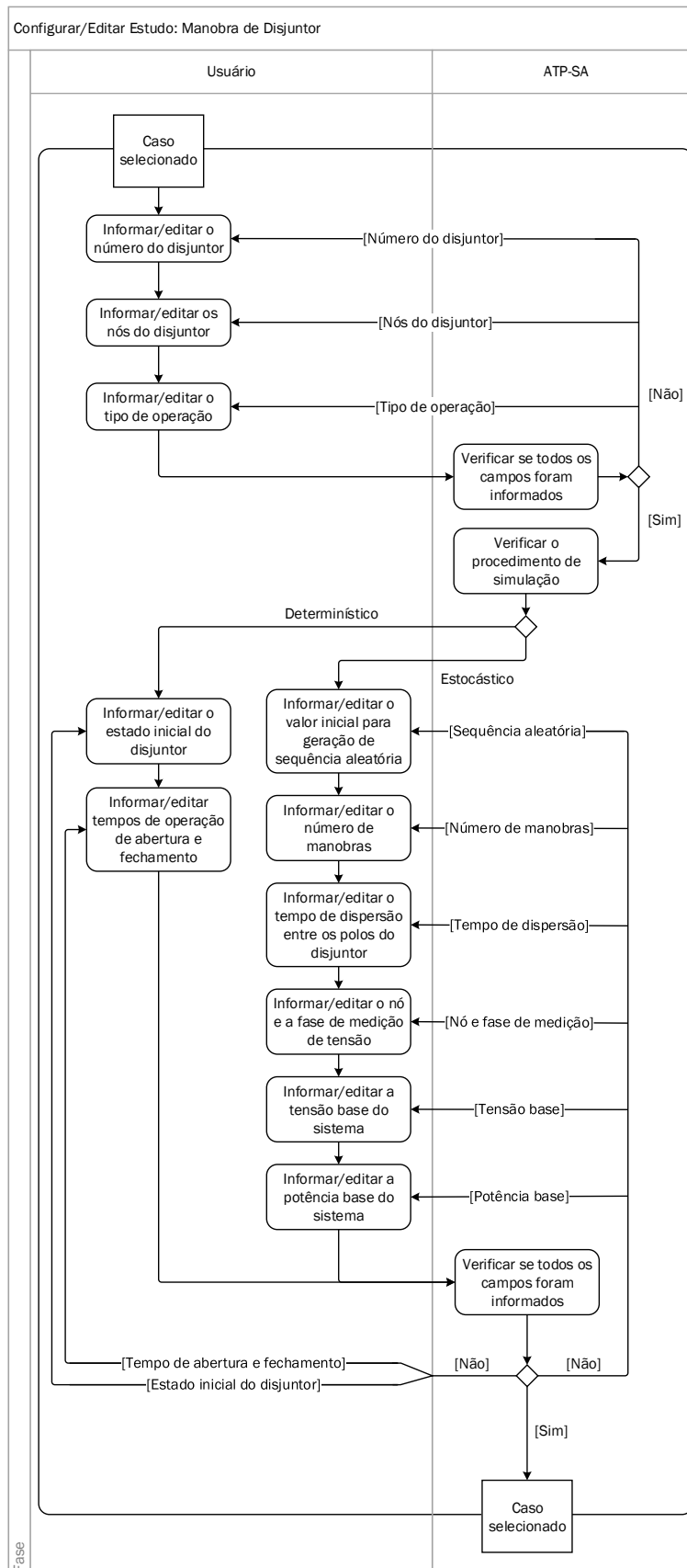
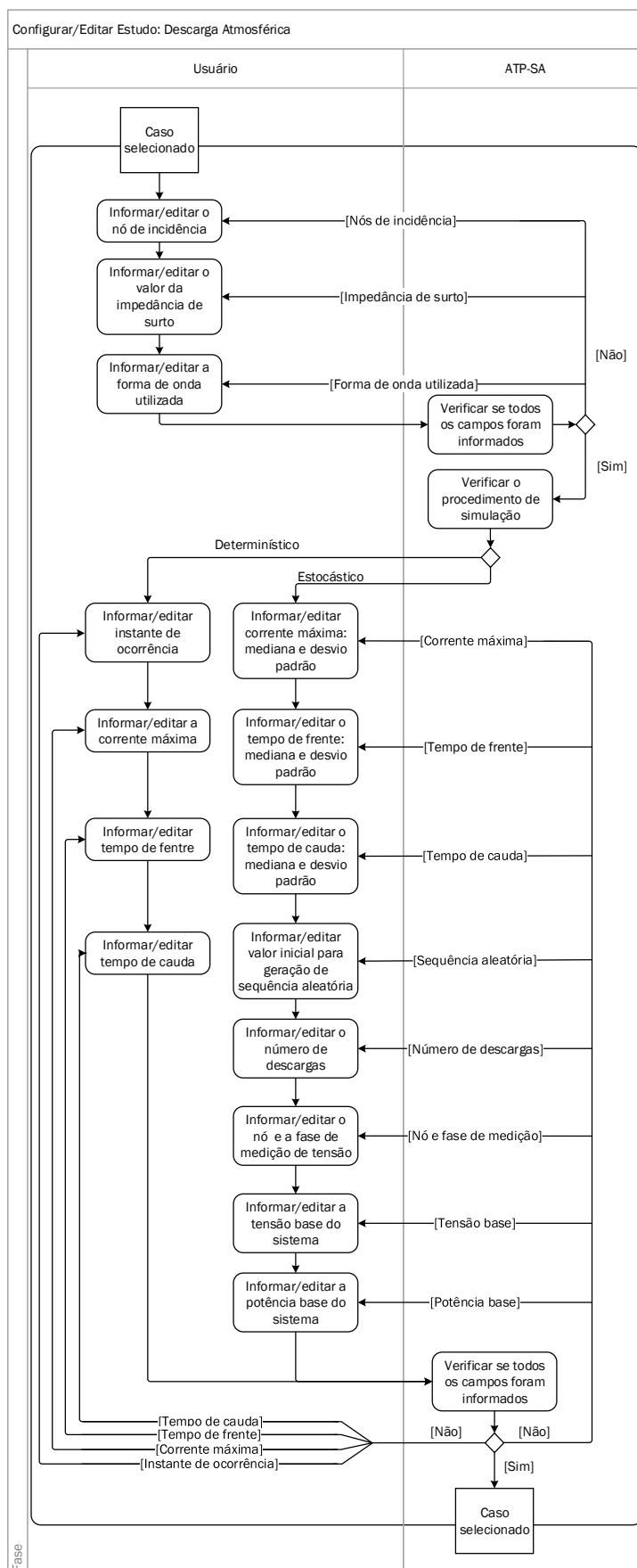


Figura A.4 – Diagrama de Subatividade: Configurar/Editar Estudo de Manobra de Disjuntor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.5 – Diagrama de Subatividade: Configurar/Editar Estudo de Descarga Atmosférica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – MODELS PARA A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE CURTOS-CIRCUITOS

```

/MODELS
MODELS
INPUT
ATPSAV {v(XXXXXX)}
ATPSAI {i(XXXXXX)}
OUTPUT
  ATPCCA
  ATPCCB
  ATPCCC
  ATPDJA
  ATPDJB
  ATPDJC
MODEL SHORT
DATA
  Seed      {dflt: 97}
  NumSC     {dflt: 100}
  PhaseSC   {dflt: 123}
  PhaseOP   {dflt: 123}
  Tclear    {dflt: 0.1}
  Td        {dflt: 5.0E-3}
  Vb        {dflt: 230E3}
  Sb        {dflt: 100E6}
  Tstart    {dflt: -1.0}
  Tstop     {dflt: 1000.0}
INPUT
  Vin
  Iin
OUTPUT
  comSC[1..3]
  comCB[1..3]
VAR
  comSC[1..3]
  comCB[1..3]
INIT
  comSC[1..3]:=0
  comCB[1..3]:=1
ENDINIT
MODEL sc FOREIGN SHORTCIRCUIT {ixdata:10, ixin:6, ixout:6, ixvar:6}
EXEC
  USE sc AS sc
  DATA
    xdata[1..10]:=[Seed, NumSC, PhaseSC, PhaseOP, Tclear, Td, Vb,
                  Sb, Tstart, Tstop]
  INPUT
    xin[1..5]:=[t, starttime, stoptime, timestep, Vin, Iin]
  HISTORY
    xvar[1..6]:=0
  OUTPUT
    comSC[1..3]:=xout[1..3]
    comCB[1..3]:=xout[4..6]
ENDUSE
ENDEXEC

```

```
ENDMODEL
USE SHORT AS SHCT
INPUT
  Vin:= ATPSAV
  Iin:= ATPSAI
DATA
  Seed:=XXXXXXXXXX
  NumSC:=XXXXXXXXXX
  PhaseSC:=XXXXXXXXXX
  PhaseOP:=XXXXXXXXXX
  Tclear:=XXXXXXXXXX
  Td:=XXXXXXXXXX
  Vb:=XXXXXXXXXX
  Sb:=XXXXXXXXXX
  Tstart:=XXXXXXXXXX
  Tstop:=XXXXXXXXXX
OUTPUT
  ATPCCA:=comSC[1]
  ATPCCB:=comSC[2]
  ATPCCC:=comSC[3]
  ATPDJA:=comCB[1]
  ATPDJB:=comCB[2]
  ATPDJC:=comCB[3]
ENDUSE
RECORD
  ATPDJA AS ATPDJA
  ATPDJB AS ATPDJB
  ATPDJC AS ATPDJC
  ATPCCA AS ATPCCA
  ATPCCB AS ATPCCB
  ATPCCC AS ATPCCC
ENDMODELS
```

APÊNDICE C – MODELS PARA A SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA DE ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR

```

/MODELS
MODELS
INPUT
ATPSAI {i(XXXXXX)}
OUTPUT
  ATPDJA
  ATPDJB
  ATPDJC
MODEL HARM
DATA
  Tc1      {dflt: 0.05}
  Tdelay   {dflt: 0.10}
  Vb       {dflt: 230E3}
  Sb       {dflt: 100E6}
  freq     {dflt: 60}
INPUT
  Current
OUTPUT
  com[1..3]
VAR
  com[1..3]
INIT
  com[1..3]:=0
ENDINIT
MODEL hr FOREIGN HARMONIC {ixdata:5, ixin:5, ixout:3, ixvar:3}
EXEC
  USE hr AS hr
  DATA
    xdata[1..5]:=[Tc1, Tdelay, Vb, Sb, freq]
  INPUT
    xin[1..5]:=[t, starttime, stoptime, timestep, Current]
  HISTORY
    xvar[1..3]:=0
  OUTPUT
    com[1..3]:=xout[1..3]
  ENDUSE
ENDEXEC
ENDMODEL
USE HARM AS HM
INPUT
  Current:= ATPSAI
DATA
  Tc1:=XXXXXXXXXX
  Tdelay:=XXXXXXXXXX
  Vb:=XXXXXXXXXX
  Sb:=XXXXXXXXXX
  freq:=XXXXXXXXXX
OUTPUT
  ATPDJA:=com[1]
  ATPDJB:=com[2]
  ATPDJC:=com[3]
ENDUSE

```

RECORDATPDJA **AS** ATPDJAATPDJB **AS** ATPDJBATPDJC **AS** ATPDJC**ENDMODELS**

APÊNDICE D – MODELS PARA A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR

```

/MODELS
MODELS
INPUT
ATPSAI {i(XXXXXX)}
OUTPUT
  ATPDJA
  ATPDJB
  ATPDJC
MODEL PTINR
DATA
  Seed      {dflt: 97}
  NumINR    {dflt: 100}
  Tdelay    {dflt: 0.1}
  Td        {dflt: 5.0E-3}
  Phase     {dflt: 1}
  Vb        {dflt: 230E3}
  Sb        {dflt: 100E6}
  freq      {dflt: 60}
  Tstart    {dflt: -1.0}
  Tstop     {dflt: 1000.0}
INPUT
  Current
OUTPUT
  com[1..3]
VAR
  com[1..3]
INIT
  com[1..3]:=0
ENDINIT

MODEL inru FOREIGN INRUSH {ixdata:10, ixin:5, ixout:3, ixvar:3}

EXEC
  USE inru AS inru
  DATA
    xdata[1..10]:=[Seed, NumINR, Tdelay, Td, Phase, Vb, Sb, freq,
                  Tstart, Tstop]
  INPUT
    xin[1..5]:=[t, starttime, stoptime, timestep, Current]
  HISTORY
    xvar[1..3]:=0
  OUTPUT
    com[1..3]:=xout[1..3]
  ENDUSE
ENDEXEC
ENDMODEL
USE PTINR AS INR
INPUT
  Current:= ATPSAI
DATA
  Seed:=XXXXXXXXXX
  NumINR:=XXXXXXXXXX

```

```
Tdelay:=XXXXXXXXXX  
Td:=XXXXXXXXXX  
Phase:=XXXXXXXXXX  
Vb:=XXXXXXXXXX  
Sb:=XXXXXXXXXX  
freq:=XXXXXXXXXX  
Tstart:=XXXXXXXXXX  
Tstop:=XXXXXXXXXX
```

OUTPUT

```
ATPDJA:=com[1]  
ATPDJB:=com[2]  
ATPDJC:=com[3]
```

ENDUSE**RECORD**

```
ATPDJA AS ATPDJA  
ATPDJB AS ATPDJB  
ATPDJC AS ATPDJC
```

ENDMODELS

APÊNDICE E – MODELS PARA A SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA DE TRT EM DISJUNTOR

```

/ MODELS
MODELS
INPUT
  ATPSA1 {v(ATP001)}
  ATPSA2 {v(ATP002)}
  ATPSA3 {v(ATP003)}
  ATPSA4 {v(ATP004)}
  ATPSA5 {v(ATP005)}
  ATPSA6 {v(ATP006)}
OUTPUT
  ATP007
  ATP008
  ATP009
  ATP010
  ATP011
  ATP012
  ATP013
  ATP014
  ATP015
MODEL BREAKER
CONST
  mincond{val:1e-6}
  power{val:5000e3}
  taum{val:2.2e-7}
  tauc{val:2.2e-7}
  vc{val:2350}
INPUT
  cur
  status
OUTPUT
  res
  aux
  aux2
VAR
  res
  aux
  aux2
  cond
  drivma
  drivca
  condma
  condca
  resma
  resca
  vma
  vca
INIT
  aux:=0;
  aux2:=0;
  condma:=1/mincond;
  condca:=1/mincond;
  cond:=condma*condca/(condma+condca);

```

```

resma:=recip(condma);
resca:=recip(condca);
res:=recip(cond);
vma:=cur*resma;
vca:=cur*resca;
ENDINIT
EXEC
  IF status=1 THEN
    aux:=0;
    aux2:=0;
    condma:=1/mincond;
    condca:=1/mincond;
    cond:=condma*condca/(condma+condca);
  ENDIF
  IF status=0 THEN
    aux:=0;
    drivma:=cur**2/power;
    DIFFEQ(1|D0+taum|D1)|condma:=drivma;
    drivca:=cur**2/vc**2;
    DIFFEQ(condca|D0+(condca*tauc)|D1)|condca:=drivca;
    cond:=condma*condca/(condma+condca);
    IF cond<mincond THEN
      condma:=mincond;
      condca:=mincond;
      cond:=mincond;
      aux2:=1;
    ENDIF
  ENDIF
  res:=recip(cond);
  resma:=recip(condma);
  resca:=recip(condca);
  vma:=cur*resma;
  vca:=cur*resca;
ENDEXEC
ENDMODEL
USE BREAKER AS BK
INPUT
  cur:= ATPSA1
  status:= ATPSA2
OUTPUT
  ATP007:=res
  ATP008:=aux
  ATP009:=aux2
ENDUSE
USE BREAKER AS BK
INPUT
  cur:= ATPSA3
  status:= ATPSA4
OUTPUT
  ATP010:=res
  ATP011:=aux
  ATP012:=aux2
ENDUSE
USE BREAKER AS BK
INPUT
  cur:= ATPSA5
  status:= ATPSA6
OUTPUT
  ATP013:=res

```

```
ATP014:=aux  
ATP015:=aux2
```

```
ENDUSE  
ENDMODELS
```


APÊNDICE F – MODELS PARA A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE MANOBRAS DE DISJUNTOR

```

/MODELS
MODELS
INPUT
ATPSAV {v(XXXXXX)}
OUTPUT
  ATPDJA
  ATPDJB
  ATPDJC
MODEL SWITCH
DATA
  Seed      {dflt: 97}
  NumSW     {dflt: 2}
  PhaseSW   {dflt: 123}
  Td        {dflt: 5.0E-3}
  Vb        {dflt: 230.0E3}
  Sb        {dflt: 100.0E6}
  Tstart    {dflt: -1.0}
  Tstop     {dflt: 1000.0}
INPUT
  Vin
OUTPUT
  com[1..3]
VAR
  com[1..3]
INIT
  com[1..3]:=0
ENDINIT
MODEL sw FOREIGN SWITCHING {ixdata:8, ixin:5, ixout:3, ixvar:3}
EXEC
  USE sw AS sw
    DATA
      xdata[1..8]:=[Seed, NumSW, PhaseSW, Td, Vb, Sb, Tstart, Tstop]
    INPUT
      xin[1..5]:=[t, starttime, stoptime, timestep, Vin]
    HISTORY
      xvar[1..3]:=0
    OUTPUT
      com[1..3]:=xout[1..3]
  ENDUSE
ENDEXEC
ENDMODEL
USE SWITCH AS SWCH
INPUT
  Vin:= ATPSAV
DATA
  Seed:=XXXXXXXXXX
  NumSW:=XXXXXXXXXX
  PhaseSW:=XXXXXXXXXX
  Td:=XXXXXXXXXX
  Vb:=XXXXXXXXXX
  Sb:=XXXXXXXXXX
  Tstart:=XXXXXXXXXX

```

```
Tstop:=XXXXXXXXX
```

OUTPUT

```
ATPDJA:=com[1]
```

```
ATPDJB:=com[2]
```

```
ATPDJC:=com[3]
```

ENDUSE**RECORD**

```
ATPDJA AS ATPDJA
```

```
ATPDJB AS ATPDJB
```

```
ATPDJC AS ATPDJC
```

ENDMODELS

APÊNDICE G – MODELS PARA A SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

```

/MODELS
MODELS
INPUT
ATPSAV {v(XXXXXX)}
OUTPUT
  ATPSAO
MODEL STROKE
DATA
  Seed      {dflt: 97}
  NumLG     {dflt: 2}
  Waveform  {dflt: 0}
  n         {dflt: 2}
  IPm       {dflt: 31.1E3}
  IPsd      {dflt: 0.484E3}
  TFm       {dflt: 3.83E-6}
  TFsd      {dflt: 0.553E-6}
  THm       {dflt: 77.5E-6}
  THsd      {dflt: 0.577E-6}
  Vb        {dflt: 230E3}
  Sb        {dflt: 100E6}
  Tstart    {dflt: -1.0}
  Tstop     {dflt: 1000.0}
INPUT
  Vin
OUTPUT
  wave
VAR
  wave
INIT
  wave:=0
ENDINIT

MODEL str FOREIGN LIGHTNING {ixdata:14, ixin:5 ixout:1, ixvar:1}

EXEC
  USE str AS str
  DATA
    xdata[1..14]:=[Seed, NumLG, Waveform, n, IPm, IPsd, TFm, TFsd,
                  THm, THsd, Vb, Sb, Tstart, Tstop]
  INPUT
    xin[1..5]:=[t, starttime, stoptime, timestep, Vin]
  HISTORY
    histdef(xvar[1]):=0
  OUTPUT
    wave:=xout[1]
  ENDUSE
ENDEXEC
ENDMODEL
USE STROKE AS STROK
INPUT
  Vin:= ATPSAV
DATA

```

```
Seed:=XXXXXXXXXX
NumLG:=XXXXXXXXXX
Waveform:=XXXXXXXXXX
n:=XXXXXXXXXX
IPm:=XXXXXXXXXX
IPsd:=XXXXXXXXXX
TFm:=XXXXXXXXXX
TFsd:=XXXXXXXXXX
THm:=XXXXXXXXXX
THsd:=XXXXXXXXXX
Vb:=XXXXXXXXXX
Sb:=XXXXXXXXXX
Tstart:=XXXXXXXXXX
Tstop:=XXXXXXXXXX
```

OUTPUT

```
ATPSAO:=wave
```

ENDUSE**RECORD**

```
ATPSAO AS ATPSAO
```

ENDMODELS