

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LUCAS DA ROCHA LAGOZA**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES DE ESTUDOS ELÉTRICOS**

**CURITIBA**

**2025**

**LUCAS DA ROCHA LAGOZA**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES DE ESTUDOS ELÉTRICOS**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRICAL STUDY SOFTWARE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto

**CURITIBA**

**2025**



[4.0 Internacional](#)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LUCAS DA ROCHA LAGOZA**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES DE ESTUDOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 18/Novembro/2025

---

Paulo Cícero Fritzen  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Raphael Augusto de Souza Benedito  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ulisses Chemin Netto  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**  
**2025**

Dedico este trabalho à minha família, amigos e professores, em especial minha esposa que sempre esteve ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Nenhuma jornada é trilhada sozinha, e este trabalho é fruto do apoio, incentivo e aprendizado compartilhado ao longo do caminho. Agradeço, primeiramente, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo conhecimento adquirido ao longo do curso. Aos meus professores, que me desafiaram a ir além e contribuíram significativamente para minha formação, em especial ao professor Ulisses Chemin Netto, pela orientação, paciência e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, pela parceria, trocas de conhecimento e incentivo nos momentos desafiadores. À minha família, por todo o suporte incondicional, pela confiança e pelas palavras de encorajamento que me motivaram a continuar.

Este é apenas um passo de muitos que ainda virão, e sou profundamente grato a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta trajetória.

## **RESUMO**

A análise de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) depende intrinsecamente de softwares especializados para garantir a segurança e a confiabilidade da rede. Contudo, a diversidade de plataformas no mercado torna a escolha da ferramenta adequada um desafio estratégico para empresas de engenharia. Este trabalho apresenta uma avaliação técnica e comparativa de três dos principais softwares da indústria: *DigSILENT PowerFactory*, *ETAP* e *SKM Power\*Tools (PTW)*. A análise foca na filosofia e na capacidade de modelagem dos quatro ativos fundamentais do SEP — geradores, linhas de transmissão, transformadores e motores —, utilizando dados de equipamentos reais para a parametrização voltada aos estudos de fluxo de potência, curto-circuito e proteção. Os resultados são consolidados em quadros comparativos que avaliam critérios como flexibilidade, usabilidade e rigor técnico, concluindo que não há uma ferramenta universalmente superior, mas sim plataformas com pontos fortes distintos, mais adequadas a diferentes perfis de aplicação, como planejamento de grandes redes, projetos industriais ou estudos de seletividade.

**Palavras-chave:** estudos elétricos; software; etap; digsilent powerfactory; ptw.

## ABSTRACT

The analysis of Electric Power Systems (EPS) intrinsically depends on specialized software to ensure the safety and reliability of the grid. However, the diversity of platforms on the market makes choosing the appropriate tool a strategic challenge for engineering companies. This work presents a technical and comparative evaluation of three of the main software in the industry: DIgSILENT PowerFactory, ETAP, and SKM Power\*Tools (PTW). The analysis focuses on the philosophy and modeling capabilities for the four fundamental assets of an EPS—generators, transmission lines, transformers, and motors—using data from real equipment for parameterization aimed at power flow, short-circuit, and protection studies. The results are consolidated in comparative tables that evaluate criteria such as flexibility, usability, and technical rigor, concluding that there is no universally superior tool, but rather platforms with distinct strengths, better suited to different application profiles, such as planning for large networks, industrial projects, or selectivity studies.

**Keywords:** electrical studies; software; etap; digsilent powerfactory; ptw.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Fluxograma do processo metodológico de análise comparativa . . . . .</b>	<b>29</b>
<b>Figura 2 – Curva de Capabilidade do gerador BRUSH BDAX 72-290ER. . . . .</b>	<b>33</b>
<b>Figura 3 – Localização do elemento Gerador Síncrono na <i>Drawing Tools</i>. . . . .</b>	<b>34</b>
<b>Figura 4 – Interface de parâmetros básicos no Tipo de Gerador Síncrono (<i>TypSym</i>). . . . .</b>	<b>35</b>
<b>Figura 5 – Interface de parâmetros de Fluxo de Potência no Tipo (<i>TypSym</i>). . . . .</b>	<b>35</b>
<b>Figura 6 – Interface de parâmetros de Curto-Circuito no Tipo (<i>TypSym</i>). . . . .</b>	<b>36</b>
<b>Figura 7 – Interface de configuração para a curva de dano no Tipo (<i>TypSym</i>) . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>Figura 8 – Interface de parametrização da Aba <i>Basic Data</i> do <i>ElmSym</i>. . . . .</b>	<b>38</b>
<b>Figura 9 – Interface de configuração de Fluxo de Potência no Elemento (<i>ElmSym</i>). . . . .</b>	<b>39</b>
<b>Figura 10 – Interface de Limites Operacionais e curva de capacidade no Elemento. . . . .</b>	<b>39</b>
<b>Figura 11 – Interface de opções de visualização de proteção no Elemento (<i>ElmSym</i>). . . . .</b>	<b>40</b>
<b>Figura 12 – Localização do elemento gerador síncrono na biblioteca do ETAP. . . . .</b>	<b>41</b>
<b>Figura 13 – Interface inicial de informações do gerador no ETAP. . . . .</b>	<b>42</b>
<b>Figura 14 – Gerador como Controle de Tensão . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>Figura 15 – Gerador como Swing . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>Figura 16 – Interface da curva de capacidade do gerador. . . . .</b>	<b>45</b>
<b>Figura 17 – Interface de impedâncias e modelos do gerador. . . . .</b>	<b>46</b>
<b>Figura 18 – Modelo preenchido com dados típicos (<i>Typical Data</i>). . . . .</b>	<b>47</b>
<b>Figura 19 – Interface de configuração de proteção do gerador. . . . .</b>	<b>48</b>
<b>Figura 20 – Localização do gerador síncrono na biblioteca do PTW. . . . .</b>	<b>48</b>
<b>Figura 21 – Interface do gerador síncrono no PTW configurado como barra <i>Swing</i>. . . . .</b>	<b>49</b>
<b>Figura 22 – Interface do gerador síncrono no PTW configurado para operar no modo PQ. . . . .</b>	<b>50</b>
<b>Figura 23 – Interface de configuração de parâmetros segundo a norma IEC 60909. . . . .</b>	<b>51</b>
<b>Figura 24 – Interface de análise da curva de decremento e dano do gerador no PTW. . . . .</b>	<b>52</b>
<b>Figura 25 – Esquema da torre de transmissão utilizada como base para o estudo de caso. . . . .</b>	<b>55</b>
<b>Figura 26 – Localização do elemento de linha (<i>Line</i>) na biblioteca do PowerFactory. . . . .</b>	<b>57</b>
<b>Figura 27 – Interface <i>Basic Data</i> do elemento linha (<i>ElmLine</i>). . . . .</b>	<b>59</b>

<b>Figura 28 – Interface da aba <i>Basic Data</i> para a configuração do Tipo de Condutor (TypCon).</b>	60
<b>Figura 29 – Interface da aba <i>Load Flow</i> para a configuração do Tipo de Condutor (TypCon).</b>	61
<b>Figura 30 – Interface inicial do Tipo de Torre (TypTow).</b>	62
<b>Figura 31 – Interface para a configuração da geometria dos cabos no TypTow.</b>	62
<b>Figura 32 – Visualização das matrizes de impedância e admitância calculadas no TypTow.</b>	63
<b>Figura 33 – Interface <i>Basic Data</i> do TypLne para entrada manual de dados.</b>	64
<b>Figura 34 – Interface de <i>Load Flow</i> no TypLne.</b>	64
<b>Figura 35 – Interface de <i>Short-Circuit</i> no TypLne.</b>	65
<b>Figura 36 – Interface de Proteção no TypLne.</b>	65
<b>Figura 37 – Localização dos elementos de Linha, Cabo e Impedância no ETAP.</b>	66
<b>Figura 38 – Acesso à biblioteca de condutores para linhas aéreas no ETAP.</b>	67
<b>Figura 39 – Etapa 1: Definição das características iniciais do condutor.</b>	67
<b>Figura 40 – Etapa 2: Janela de inserção de dados físicos e elétricos do condutor.</b>	68
<b>Figura 41 – Página <i>Parameter</i> para seleção dos condutores da biblioteca.</b>	69
<b>Figura 42 – Página <i>Configuration</i> para definição da geometria da torre.</b>	70
<b>Figura 43 – Interface da página <i>Impedance</i> com os resultados calculados.</b>	71
<b>Figura 44 – Exemplo de matriz de reatância calculada pelo software.</b>	71
<b>Figura 45 – Interface da página <i>Protection</i> para a linha de transmissão.</b>	72
<b>Figura 46 – Interface da ferramenta para o cálculo de Flecha e Tração no cabo.</b>	73
<b>Figura 47 – Interface da ferramenta de cálculo de ampacidade.</b>	74
<b>Figura 48 – Interface da ferramenta de compensação para linhas de transmissão.</b>	75
<b>Figura 49 – Localização dos elementos <i>Transmission Line</i> e <i>Impedância PI</i> no PTW.</b>	76
<b>Figura 50 – Interface principal de configuração do elemento de linha de transmissão no PTW.</b>	76
<b>Figura 51 – Interface da biblioteca do PTW para modelos de linhas de transmissão.</b>	77
<b>Figura 52 – Interface do <i>Standard Transmission Line Model</i> na biblioteca do PTW.</b>	78
<b>Figura 53 – Interface do <i>Enhanced Transmission Line Model</i>, que considera acoplamento mútuo.</b>	78
<b>Figura 54 – Localização do elemento ElmTr2 na paleta de ferramentas de desenho.</b>	82

<b>Figura 55 – Interface <i>Basic Data</i> para a configuração do Tipo (TypTr2).</b>	83
<b>Figura 56 – Flexibilidade de entrada de dados de impedância de sequência no TypTr2.</b>	83
<b>Figura 57 – Interface de configuração do modelo T equivalente na aba <i>Load Flow</i>.</b>	84
<b>Figura 58 – Interface para modelagem da curva de saturação do núcleo.</b>	84
<b>Figura 59 – Interface de configuração detalhada do comutador de taps.</b>	85
<b>Figura 60 – Interface de parâmetros de proteção no TypTr2.</b>	86
<b>Figura 61 – Interface da aba <i>Basic Data</i> do elemento ElmTr2.</b>	87
<b>Figura 62 – Interface de configuração do <i>Load Flow</i> no elemento ElmTr2.</b>	88
<b>Figura 63 – Interface da aba <i>Advanced</i> do elemento ElmTr2.</b>	88
<b>Figura 64 – Interface de configuração de Curto-Círcuito no elemento ElmTr2.</b>	89
<b>Figura 65 – Interface de configuração da Curva de Dano no elemento ElmTr2.</b>	90
<b>Figura 66 – Localização do elemento de transformador de dois enrolamentos no ETAP.</b>	90
<b>Figura 67 – Interface de configuração da página <i>Info</i> do transformador.</b>	92
<b>Figura 68 – Interface de configuração da página <i>Rating</i>.</b>	93
<b>Figura 69 – Interface da página <i>Impedance</i> com os dados de placa do transformador.</b>	94
<b>Figura 70 – Interface da página <i>Impedance</i> com parâmetros estimados via <i>Typical Data</i>.</b>	95
<b>Figura 71 – Interface de configuração do comutador de taps do transformador ETAP</b>	96
<b>Figura 72 – Interface de configuração ferramenta Otimização do TAP do ETAP</b>	96
<b>Figura 73 – Interface de configuração do aterramento do transformador no ETAP.</b>	97
<b>Figura 74 – Interface com parâmetros de proteção calculados e definidos pelo usuário.</b>	98
<b>Figura 75 – Localização do elemento de transformador de dois enrolamentos no PTW.</b>	99
<b>Figura 76 – Interface de configuração básica do transformador no PTW.</b>	100
<b>Figura 77 – Interface de configuração de impedâncias e perdas do transformador no PTW.</b>	101
<b>Figura 78 – Interface com a calculadora de impedância do PTW</b>	102
<b>Figura 79 – Interface de configuração da Curva de Dano e Corrente de Inrush no PTW.</b>	103
<b>Figura 80 – Curvas vs. Rotação</b>	108
<b>Figura 81 – Curvas vs. Potência</b>	109

<b>Figura 82 – Localização do elemento <i>Asynchronous Machine</i> (ElmAsm).</b>	110
<b>Figura 83 – Interface <i>Basic Data</i> do TypAsm com o modo de entrada por dados de placa selecionado.</b>	111
<b>Figura 84 – Interface de cálculo de parâmetros na aba <i>Load Flow</i> do TypAsm.</b>	112
<b>Figura 85 – Visualização das curvas de torque e corrente estimadas na aba <i>Advanced</i>.</b>	112
<b>Figura 86 – Interface de configuração de parâmetros para estudos de curto-circuito no TypAsm.</b>	113
<b>Figura 87 – Interface de configuração de parâmetros para estudos de proteção no TypAsm.</b>	113
<b>Figura 88 – Localização do elemento <i>Induction Machine</i> na barra de ferramentas do ETAP.</b>	114
<b>Figura 89 – Interface de configuração da página <i>Info</i> do motor.</b>	115
<b>Figura 90 – Interface de configuração da aba <i>Nameplate</i>.</b>	116
<b>Figura 91 – Interface para seleção de dados típicos do motor.</b>	116
<b>Figura 92 – Interface de configuração de impedâncias do motor.</b>	117
<b>Figura 93 – Interface de definição do modelo dinâmico do motor.</b>	118
<b>Figura 94 – Interface para configuração das curvas de partida e dano do motor.</b>	119
<b>Figura 95 – Localização do elemento Motor de Indução na barra de ferramentas do PTW.</b>	120
<b>Figura 96 – Interface principal de configuração do Motor de Indução no PTW.</b>	121
<b>Figura 97 – Interface de configuração das condições de carregamento na sub-vista <i>Motor Diversity</i>.</b>	122
<b>Figura 98 – Interface de configuração da contribuição para curto-circuito (Norma IEC).</b>	123
<b>Figura 99 – Interface para modelagem das curvas de partida e dano do motor.</b>	125
<b>Figura 100 –Folha de dados do transformador WEG</b>	141

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Características Elétricas e Mecânicas do Gerador BRUSH BDAX 72-290ER.</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>Tabela 2 – Quadro Comparativo da Modelagem de Geradores Síncronos nos Softwares.</b> . . . . .	<b>53</b>
<b>Tabela 3 – Parâmetros Consolidados da Linha de Transmissão para o Estudo de Caso.</b> . . . . .	<b>56</b>
<b>Tabela 4 – Quadro Comparativo da Modelagem de Linhas de Transmissão e Cabos.</b> . . . . .	<b>79</b>
<b>Tabela 5 – Dados Técnicos Consolidados do Transformador de Força WEG (20 MVA, 138/13.8 kV).</b> . . . . .	<b>81</b>
<b>Tabela 6 – Quadro Comparativo da Modelagem de Transformadores nos Softwares.</b> . . . . .	<b>104</b>
<b>Tabela 7 – Dados Técnicos Consolidados do Motor de Indução WEG HGF-AT-TEFC.</b> . . . . .	<b>107</b>
<b>Tabela 8 – Quadro Comparativo da Modelagem de Motores de Indução nos Softwares.</b> . . . . .	<b>126</b>
<b>Tabela 9 – Quadro Avaliativo Geral das Plataformas de Software.</b> . . . . .	<b>130</b>
<b>Tabela 10 – Definição da Escala de Classificação Qualitativa (Ordem Decrescente de Desempenho)</b> . . . . .	<b>131</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo . . . . .</b>	<b>17</b>
1.1.1	Delimitação do Escopo da Análise . . . . .	18
<b>1.2</b>	<b>Justificativa . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelagem para Estudos de Fluxo de Potência . . . . .</b>	<b>20</b>
2.1.1	Geradores e Cargas . . . . .	21
2.1.2	Linhas de Transmissão e Transformadores . . . . .	22
2.1.3	Controle de Tensão e Potência Reativa . . . . .	22
<b>2.2</b>	<b>Modelagem para Estudos de Curto-Círcuito . . . . .</b>	<b>23</b>
2.2.1	O Método das Componentes Simétricas . . . . .	23
2.2.2	Aspectos da Norma IEC 60909 . . . . .	24
2.2.3	Máquinas Girantes (Geradores e Motores) . . . . .	25
2.2.4	Componentes Estáticos (Linhas e Transformadores) . . . . .	25
<b>2.3</b>	<b>Modelagem para Estudos de Proteção e Seletividade . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>2.4</b>	<b>Conclusão do Capítulo . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E MODELAGEM COMPARATIVA . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>Fluxograma Metodológico . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>3.2</b>	<b>Geradores . . . . .</b>	<b>31</b>
3.2.1	Definição do Estudo da Caso Modelagem . . . . .	31
3.2.2	Modelagem de Geradores no DlgSILENT PowerFactory . . . . .	33
3.2.2.1	Configuração do Tipo de Máquina ( <u>TypSym</u> ) . . . . .	34
3.2.2.1.1	<i>Aba Basic Data</i> . . . . .	34
3.2.2.1.2	<i>Aba Load Flow</i> . . . . .	35
3.2.2.1.3	<i>Aba Short-Circuit VDE/IEC</i> . . . . .	35
3.2.2.1.4	<i>Aba Protection e Curva de Dano Térmico</i> . . . . .	36
3.2.2.2	Configuração do Elemento no Diagrama ( <u>ElmSym</u> ) . . . . .	37
3.2.2.2.1	<i>Aba Basic Data</i> . . . . .	37
3.2.2.2.2	<i>Aba Load Flow (do Elemento)</i> . . . . .	38

3.2.2.2.3	<i>Configuração do Elemento Gerador para Curto-Circuito</i>	40
3.2.2.2.4	<i>Aba Protection</i>	40
3.2.3	Modelagem de Geradores no ETAP	40
3.2.3.1	<u>Página de Dados Nominais (Rating)</u>	42
3.2.3.2	<u>Página de Curva de Capabilidade (Capability)</u>	44
3.2.3.3	<u>Página de Impedância e Modelo (Imp/Model)</u>	45
3.2.3.4	<u>Página de Proteção (Protection)</u>	47
3.2.4	Modelagem de Gerador no PTW	48
3.2.4.1	<u>Dados Gerais e Modo de Operação (Subview: Synchronous Generator)</u>	49
3.2.4.2	<u>Contribuição para Curto-Circuito (Subview: IEC Contribution)</u>	50
3.2.4.3	<u>Curva de Decremento e Dano (Subview: Decrement Curve)</u>	51
3.2.4.3.1	<i>Análise da Curva de Decremento</i>	51
3.2.4.3.2	<i>Definição da Curva de Dano</i>	52
3.2.5	Quadro Comparativo e Conclusões da Seção dos Geradores	52
3.2.5.0.1	<u>Conclusão da Análise</u>	54
<b>3.3</b>	<b>Linhas de Trasmissão</b>	<b>54</b>
3.3.1	Definição do Estudo de Caso para Modelagem	55
3.3.2	Modelagem da Linha de Transmissão no DIgSILENT PowerFactory	56
3.3.2.1	<u>A Modelagem Modular de Linhas de Transmissão</u>	57
3.3.2.1.1	<i>Abordagem Detalhada (Baseada na Geometria)</i>	57
3.3.2.1.1.1	Etapa 1: Definição dos Tipos na Biblioteca	57
3.3.2.1.1.2	Etapa 2: Associação no Diagrama Unifilar	58
3.3.2.1.2	<i>Abordagem Prática (Entrada Direta de Dados)</i>	58
3.3.2.1.3	<i>Tipo para Cabos Subterrâneos (TypCabsys)</i>	58
3.3.2.2	<u>Configuração do Elemento de Linha (ElmLne)</u>	59
3.3.2.3	<u>Definição do Tipo de Condutor (TypCon)</u>	60
3.3.2.4	<u>Definição do Tipo de Torre (TypTow)</u>	61
3.3.2.5	<u>Definição do Tipo de Linha (TypLne)</u>	63
3.3.3	Modelagem da Linha de Transmissão no ETAP	65
3.3.3.1	<u>Etapa 1: Definição do Condutor na Biblioteca</u>	66
3.3.3.2	<u>Etapa 2: Configuração do Elemento de Linha de Transmissão</u>	68
3.3.3.2.1	<i>Páginas Parameter e Configuration</i>	68

<u>3.3.3.2.2</u>	<i>Página Impedance</i>	70
<u>3.3.3.2.3</u>	<i>Página Protection</i>	71
<u>3.3.3.3</u>	<u>Ferramentas de Análise Adicionais</u>	72
<u>3.3.3.3.1</u>	<i>Flecha e Tração (Sag and Tension)</i>	72
<u>3.3.3.3.2</u>	<i>Ampacidade (Ampacity)</i>	73
<u>3.3.3.3.3</u>	<i>Compensação (Compensation)</i>	74
<u>3.3.4</u>	Modelagem de Linhas de Transmissão no PTW	75
<u>3.3.4.1</u>	<u>Modelos de Linha na Biblioteca do PTW</u>	76
<u>3.3.5</u>	Quadro Comparativo e Conclusões da Seção da Linha de Trasmissão	78
<u>3.3.5.0.1</u>	<i>Conclusão da Análise</i>	80
<b>3.4</b>	<b>Transformadores de Força</b>	<b>80</b>
<u>3.4.0.1</u>	<u>Definição do Estudo de Caso Modelagem</u>	80
<u>3.4.1</u>	Modelagem do Transformador no DIgSILENT PowerFactory	81
<u>3.4.1.1</u>	<u>Configuração do Tipo de Transformador (TypTr2)</u>	82
<u>3.4.1.1.1</u>	<i>Aba Basic Data</i>	82
<u>3.4.1.1.2</u>	<i>Aba Load Flow</i>	84
<u>3.4.1.1.3</u>	<i>Aba Tap Changer</i>	85
<u>3.4.1.1.4</u>	<i>Aba Protection</i>	85
<u>3.4.1.2</u>	<u>Configuração do Elemento no Diagrama (ElmTr2)</u>	86
<u>3.4.1.2.1</u>	<i>Aba Basic Data</i>	86
<u>3.4.1.2.2</u>	<i>Aba Load Flow</i>	87
<u>3.4.1.2.3</u>	<i>Aba Short-Circuit VDE/IEC</i>	88
<u>3.4.1.2.4</u>	<i>Aba Protection</i>	89
<u>3.4.2</u>	Modelagem do Transformador no ETAP	90
<u>3.4.2.1</u>	<u>Página de Informações Gerais (Info)</u>	90
<u>3.4.2.2</u>	<u>Página de Dados Nominais (Rating)</u>	92
<u>3.4.2.3</u>	<u>Página de Impedância (Impedance)</u>	93
<u>3.4.2.4</u>	<u>Página do Comutador de Taps (TAP)</u>	95
<u>3.4.2.5</u>	<u>Página de Aterramento (Grounding)</u>	97
<u>3.4.2.5.1</u>	<i>Resumo da Aba de Proteção do Transformador</i>	97
<u>3.4.3</u>	Modelagem do Transformador no PTW	98
<u>3.4.3.1</u>	<u>Dados Gerais e Modo de Operação (Subview: 2-Winding Transformer)</u>	99

<u>3.4.3.2</u>	Parâmetros Elétricos (Subview: Transformer Impedance) . . . . .	100
<u>3.4.3.2.1</u>	<i>Impedâncias de Sequência e Calculadoras</i> . . . . .	100
<u>3.4.3.2.2</u>	<i>Impedâncias de Sequência e Calculadoras</i> . . . . .	101
<u>3.4.3.3</u>	Resumo da Funcionalidade Automatic LTC . . . . .	102
<u>3.4.3.4</u>	Curva de Dano e Inrush (Subview: Damage Curve) . . . . .	102
<u>3.4.3.4.1</u>	<i>Definição da Curva de Dano</i> . . . . .	102
<u>3.4.3.4.2</u>	<i>Característica de Corrente de Inrush</i> . . . . .	103
<u>3.4.4</u>	Análise Crítica e Quadro Comparativo dos Tranformadores . . . . .	103
<u>3.4.4.0.1</u>	<i>Conclusão da Análise</i> . . . . .	105
<b>3.5</b>	<b>Motores</b> . . . . .	<b>106</b>
<u>3.5.0.1</u>	Definição do Estudo de Caso Modelagem . . . . .	106
<u>3.5.1</u>	Modelagem do Motor de Indução no DlgSILENT PowerFactory . . . . .	109
<u>3.5.1.1</u>	Configuração do Tipo de Máquina Assíncrona (TypAsm) . . . . .	110
<u>3.5.1.1.1</u>	<i>Aba Basic Data</i> . . . . .	110
<u>3.5.1.1.2</u>	<i>Aba Load Flow</i> . . . . .	111
<u>3.5.1.1.3</u>	<i>Abas Short-Circuit e Protection</i> . . . . .	113
<u>3.5.1.2</u>	Configuração do Elemento no Diagrama (ElmAsm) . . . . .	114
<u>3.5.2</u>	Modelagem do Motor de Indução no ETAP . . . . .	114
<u>3.5.2.1</u>	Páginas de Configuração Geral ( <i>Info</i> e <i>Nameplate</i> ) . . . . .	114
<u>3.5.2.1.1</u>	<i>Aba Info</i> . . . . .	115
<u>3.5.2.1.2</u>	<i>Aba Nameplate</i> . . . . .	115
<u>3.5.2.2</u>	Parâmetros para Estudos Dinâmicos ( <i>Impedance</i> e <i>Model</i> ) . . . . .	117
<u>3.5.2.2.1</u>	<i>Aba Impedance</i> . . . . .	117
<u>3.5.2.2.2</u>	<i>Aba Model</i> . . . . .	118
<u>3.5.2.3</u>	Parâmetros e Ferramentas de Proteção ( <i>Protection</i> ) . . . . .	118
<u>3.5.2.4</u>	Configurações Adicionais Integradas . . . . .	119
<u>3.5.3</u>	Modelagem do Motor de Indução no PTW . . . . .	120
<u>3.5.3.1</u>	Dados Gerais e Parâmetros de Estudo (Subview: Induction Motor) . . . . .	120
<u>3.5.3.1.1</u>	<i>Dados para Fluxo de Carga</i> . . . . .	120
<u>3.5.3.1.2</u>	<i>Dados para Curto-Circuito e Partida</i> . . . . .	120
<u>3.5.3.1.3</u>	<i>Agrupamento e Conexão</i> . . . . .	120
<u>3.5.3.2</u>	Condições de Carregamento (Subview: Motor Diversity) . . . . .	121

3.5.3.3	Parâmetros para Curto-Circuito (Subview: IEC Contribution) . . . . .	122
3.5.3.4	Modelagem da Curva de Partida e Dano do Motor . . . . .	123
3.5.3.4.1	<i>Definição da Curva de Partida</i> . . . . .	123
3.5.3.4.2	<i>Definição das Curvas de Dano Térmico</i> . . . . .	124
3.5.4	Análise Crítica e Quadro Comparativo de Motores de Indução . . . . .	125
3.5.4.0.1	<i>Conclusão da Análise</i> . . . . .	126
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA</b> . . . . .	<b>128</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise Comparativa por Componente</b> . . . . .	<b>128</b>
4.1.1	Geradores Síncronos . . . . .	128
4.1.2	Linhas de Transmissão e Cabos . . . . .	128
4.1.3	Transformadores de Força . . . . .	129
4.1.4	Motores de Indução . . . . .	129
<b>4.2</b>	<b>Quadro Comparativo Geral e Conclusão</b> . . . . .	<b>129</b>
4.2.0.0.1	<i>Conclusão Final da Análise</i> . . . . .	131
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b> . . . . .	<b>132</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões da Análise Comparativa</b> . . . . .	<b>132</b>
<b>5.2</b>	<b>Perspectivas para Trabalhos Futuros</b> . . . . .	<b>133</b>
	<b>Referências</b> . . . . .	<b>134</b>
	<b>APÊNDICE A OVERVIEW</b> . . . . .	<b>137</b>
A.0.1	DIGSILENT PowerFactory . . . . .	137
A.0.2	ETAP ( <i>Electrical Transient Analyzer Program</i> ) . . . . .	137
A.0.3	SKM Power*Tools for Windows (PTW) . . . . .	138

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos com o avanço da tecnologia para os desenvolvimentos dos computadores foi possível criar programas mais sofisticados para várias demandas profissionais. Isso possibilitou o desenvolvimento de *softwares* dedicados a estudos elétricos, pois até então alguns estudos para o Sistema Elétrico de Potência (SEP) eram realizados pelo uso dos TNAs (*Transient Network Analyzer*) (Hirakami e Neugebauer 1981).

Dentro desse contexto, os estudos elétricos como, por exemplo, fluxo de potência, curto-circuito e proteção, têm um papel crucial, fornecendo análises detalhadas e *insights* essenciais para o planejamento, a operação e a proteção do SEP visando a obtenção dos melhores índices de continuidade e receita em um ambiente sustentável e eficiente.

Para conduzir estudos elétricos no SEP com precisão e eficiência as empresas, dos mais variados segmentos, contam com uma profusão de *softwares* especializados para modelar, simular e analisar uma ampla gama de fenômenos elétricos. No entanto, diante da diversidade de opções disponíveis no mercado, a escolha do *software* mais apropriado para cada situação apresenta-se como um desafio relevante. A seleção do programa mais apropriado vai além da simples capacidade de calcular correntes e tensões. Considerando aspectos como facilidade de uso, flexibilidade, escalabilidade e custo-benefício, essa decisão impacta diretamente no fluxo de trabalho e na qualidade dos estudos elétricos realizados pelas empresas.

Diante desse panorama, surge a necessidade de uma avaliação comparativa minuciosa dos *softwares* disponíveis para a realização de estudos elétricos no SEP com o intuito de oferecer às empresas uma base sólida para suas decisões. Este estudo propõe uma análise sob determinados aspectos das características de operação de alguns *softwares* especializados em estudos elétricos visando fornecer informações relevantes que possam ajudar as empresas na escolha da ferramenta computacional mais adequada às suas necessidades específicas.

### 1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo é realizar uma avaliação comparativa dos *softwares* *DIGSILENT PowerFactory*, *ETAP* e *PTW*<sup>1</sup>, delimitando o escopo da análise à sua capacidade de parametrização dos quatro ativos fundamentais do SEP: geradores, linhas de transmissão, transformadores e motores. A comparação será fundamentada em critérios técnicos, como a flexibilidade de modelagem, a facilidade de uso para o engenheiro, a disponibilidade de recursos de análise adicionais e o rigor técnico na aplicação de normas. Ao final, busca-se caracterizar os pontos

---

<sup>1</sup> A seleção das três plataformas de software para este estudo comparativo representa um recorte metodológico, baseado na observada proeminência destas ferramentas no mercado de análise de sistemas elétricos e em sua notória aplicação em setores industriais estratégicos no Brasil, como os de papel e celulose e óleo e gás.

fortes de cada plataforma, auxiliando na escolha da ferramenta mais adequada para diferentes aplicações em engenharia elétrica.

### 1.1.1 Delimitação do Escopo da Análise

Para os fins deste trabalho, a análise da parametrização dos componentes será focada nos requisitos dos seguintes estudos fundamentais: Fluxo de Potência; Curto-Círcuito, com ênfase na metodologia da norma IEC 60909; e Proteção e Seletividade, avaliando-se primariamente como cada plataforma modela as curvas de dano dos equipamentos, característica essencial para a coordenação de dispositivos.

## 1.2 Justificativa

A seleção da plataforma de software adequada para a análise do SEP é uma decisão técnica e estratégica de grande impacto para concessionárias, indústrias e empresas de engenharia. A escolha correta da ferramenta pode otimizar o tempo de projeto, aumentar a precisão dos estudos e garantir a segurança e a confiabilidade das instalações elétricas. No entanto, a documentação e a análise comparativa entre as principais ferramentas de mercado — DIgSILENT PowerFactory, ETAP e PTW — focando especificamente em suas filosofias e capacidades de modelagem, ainda é um campo pouco explorado na literatura acadêmica.

Nesse contexto, este trabalho se justifica pela necessidade de fornecer uma análise técnica aprofundada e imparcial, que vai além de uma simples listagem de funcionalidades. Ao detalhar o processo de modelagem dos quatro ativos mais críticos e de maior custo de um SEP, este estudo busca oferecer um guia prático e fundamentado para auxiliar estudantes, engenheiros e gestores na escolha da ferramenta mais adequada às suas necessidades específicas, seja para o planejamento de grandes redes, projetos industriais ou estudos de proteção.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, que guiam o leitor desde os conceitos fundamentais até a análise crítica e comparativa das plataformas de software.

- **Capítulo 1 - Introdução**

Este capítulo apresenta o tema, delimita o escopo da pesquisa, define os objetivos do trabalho e expõe a justificativa para a sua realização, contextualizando a importância da análise comparativa de softwares para a engenharia de sistemas de potência.

- **Capítulo 2 - Referencial Teórico**

Neste capítulo, será abordada a evolução histórica da análise de sistemas de potênc-

cia, contrastando os métodos clássicos com as modernas ferramentas computacionais. Adicionalmente, será apresentada a fundamentação teórica essencial para a modelagem de cada um dos quatro ativos elétricos em estudo: Geradores Síncronos, Linhas de Transmissão, Transformadores de Força e Motores de Indução.

- **Capítulo 3 - Análise Comparativa da Modelagem de Componentes**

Este é o capítulo central do trabalho. Nele, será realizada uma investigação detalhada e comparativa do processo de modelagem de cada um dos quatro ativos nas três plataformas de software: DlgSILENT *PowerFactory*, ETAP e PTW. Para cada componente, serão analisadas as interfaces, as filosofias de trabalho, as ferramentas disponíveis e o nível de detalhamento técnico, utilizando como base os dados de equipamentos comerciais reais para contextualizar a análise. Ao final de cada seção, um quadro comparativo consolidará os achados.

- **Capítulo 4 - Resultados e Análise Comparativa**

O capítulo final apresentará os resultados consolidados da pesquisa. Será construído um quadro avaliativo geral, comparando os softwares com base em critérios como flexibilidade, facilidade de uso, recursos adicionais e rigor técnico. Por fim, serão apresentadas as conclusões do trabalho, destacando os pontos fortes e as aplicações ideais de cada plataforma.

- **Capítulo 5 - Conclusão e Perspectivas Futuras**

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho e discutidas possíveis continuações e desdobramentos desta pesquisa, sugerindo novos caminhos e estudos a partir dos resultados alcançados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A análise de sistemas elétricos de potência evoluiu de ferramentas históricas, como o *Transient Network Analyzer (TNA)*, para *softwares* de simulação digital modernos. O TNA, um modelo analógico, era eficaz para estudos de transitórios de comutação em sistemas simples, conforme discutido por (Hirakami e Neugebauer 1981), mas apresentava limitações significativas em flexibilidade e na modelagem de redes complexas. A transição para plataformas digitais, impulsionada pela introdução de microcomputadores para aquisição de dados (Pratico e Eitzmann 1994), representou um grande avanço.

*Softwares* como *ETAP* e *DigSILENT PowerFactory* superaram as limitações dos métodos analógicos, oferecendo maior precisão e a capacidade de modelar sistemas de grande escala e dispositivos modernos como *FACTS*. Estudos de caso demonstram essa superioridade, como a análise do impacto de um *SVC* utilizando o *ETAP* (Siddique *et al.* 2019) e a simulação integrada da rede de 400 kV do Iraque com o *PowerFactory* (Al-Akaysee *et al.* 2020).

Essa evolução e a diversidade de ferramentas disponíveis criam a necessidade de uma comparação estruturada entre os *softwares*. A escolha da plataforma adequada tornou-se um fator crucial que impacta a precisão dos estudos e a eficiência do fluxo de trabalho. Para realizar uma análise comparativa fundamentada, no entanto, é preciso primeiro compreender a abordagem e a filosofia de trabalho que cada software adota para a parametrização dos componentes, pois é sobre essa base prática que a comparação se sustenta.

Portanto, este capítulo apresenta os fundamentos teóricos da modelagem dos principais ativos de um Sistema Elétrico de Potência (SEP), com foco em sua aplicação para os três estudos centrais deste trabalho: fluxo de potência, curto-círcuito e proteção.

### 2.1 Modelagem para Estudos de Fluxo de Potência

O estudo de fluxo de potência, ou fluxo de carga, constitui a principal ferramenta para a análise do sistema em regime permanente, tendo como objetivo determinar o estado operativo da rede — magnitudes e ângulos de tensão ( $|V|, \delta$ ) e fluxos de potência ativa e reativa ( $P, Q$ ) — conforme (Stevenson Jr. 1986). Matematicamente, esse problema é formulado como a resolução de um sistema de equações algébricas não lineares que descrevem o balanço de potência em cada nó do sistema. Assim, para uma rede composta por  $N$  barras, as equações para uma barra genérica  $i$  são dadas por:

$$P_i = |V_i| \sum_{k=1}^N |V_k| |Y_{ik}| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (1)$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{k=1}^N |V_k| |Y_{ik}| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (2)$$

Onde  $P_i$  e  $Q_i$  são as injeções líquidas de potência ativa e reativa na barra  $i$ ;  $|V_i|$  e  $\delta_i$  são a magnitude e o ângulo da tensão na barra  $i$ ; e  $|Y_{ik}|$  e  $\theta_{ik}$  são a magnitude e o ângulo do elemento  $ik$  da matriz admitância de barra ( $Y_{bus}$ ) (Grainger e Stevenson 1994).

Devido à sua natureza não linear, este sistema de equações é resolvido por métodos numéricos iterativos. O método de **Newton-Raphson** é o padrão da indústria, reconhecido por sua robustez e convergência quadrática. Ele utiliza uma aproximação linear da função em torno de um ponto de operação para calcular os incrementos de tensão ( $\Delta V$  e  $\Delta\delta$ ) a cada iteração, por meio da inversão da matriz Jacobiana, até que as potências calculadas converjam para os valores especificados (Monticelli 1983). A correta modelagem dos componentes é o que permite a montagem da matriz  $Y_{bus}$  e a definição das variáveis conhecidas para iniciar o processo iterativo.

### 2.1.1 Geradores e Cargas

Para a correta simulação do fluxo de potência, as fontes de geração e os pontos de consumo de energia são representados por modelos específicos de barras, que definem as variáveis conhecidas a serem calculadas pelo *software*. Essa representação fidedigna é o pilar de um estudo confiável. Uma vez que os geradores ditam as injeções de potência e os níveis de tensão, e as cargas definem a demanda a ser suprida, qualquer imprecisão em seus modelos se propagará por toda a simulação. Isso pode levar a conclusões equivocadas sobre o carregamento de linhas e transformadores, o cálculo de perdas e, de forma mais crítica, sobre a estabilidade da tensão em toda a rede (Grainger e Stevenson 1994).

- **Gerador Síncrono:** Em estudos de fluxo de potência, a barra onde o gerador é conectado é tipicamente modelada como uma barra do tipo **PV**, onde sua injeção de potência ativa ( $P$ ) e a magnitude da tensão terminal ( $|V|$ ) são especificadas (Monticelli 1983). Uma das máquinas do sistema é designada como **barra de referência (Slack)**, com magnitude e ângulo de tensão ( $|V|, \delta$ ) fixos, para fechar o balanço de potência do sistema (Monticelli 1983). Os limites de operação do gerador são definidos pela sua **curva de capacidade**, que estabelece os valores mínimos e máximos de potência reativa ( $Q_{min}, Q_{max}$ ) que ele pode fornecer ou absorver, garantindo que o modelo reflita sua capacidade real de operar sob variações de carga (Umans 2014).
- **Motores e Cargas Estáticas:** As cargas do sistema, incluindo os motores em regime permanente, são comumente representadas como uma barra do tipo **PQ**, onde o consumo de potência ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ) é considerado constante e conhecido (Monticelli 1983).

### 2.1.2 Linhas de Transmissão e Transformadores

Os elementos da rede de transmissão e distribuição são modelados por meio de seus circuitos equivalentes, que representam as perdas e os efeitos reativos que impactam o fluxo de potência. A precisão desses circuitos é determinante para o resultado do estudo, pois a impedância série desses elementos governa diretamente as quedas de tensão e as perdas de potência na rede. Um modelo inadequado pode mascarar problemas de sobrecarga ou de violação de limites de tensão, comprometendo a análise da segurança e da eficiência operacional do sistema (Stevenson Jr. 1986).

- **Linhas de Transmissão:** Para estudos de fluxo de carga, linhas de comprimento curto a médio são adequadamente representadas pelo seu circuito  $\Pi$  **equivalente**. Este modelo concentra a impedância série da linha ( $Z = R + j\omega L$ ) em um único elemento e divide a admitância shunt total ( $Y = G + j\omega C$ ) em duas metades, conectadas em cada terminal da linha. O ramo série representa as perdas ôhmicas e a queda de tensão indutiva, enquanto os ramos *shunt* modelam o efeito capacitivo entre os condutores, responsável pela injeção de potência reativa na rede. No entanto, para linhas longas ou quando se exige maior precisão, o modelo de parâmetros distribuídos é o mais indicado, pois considera que esses efeitos ocorrem ao longo de toda a extensão da linha (Stevenson Jr. 1986).
- **Transformadores:** São modelados por uma impedância série equivalente que representa a reatância de dispersão e as perdas no cobre (Stevenson Jr. 1986). Adicionalmente, um ramo shunt pode ser incluído para representar as perdas no núcleo e a corrente de magnetização. Sua capacidade de alterar a tensão é representada por uma relação de transformação fora do nominal ( $a$ ), que pode ser controlada pelo **comutador de taps (LTC)**, um dispositivo essencial para a regulação de tensão no sistema (Chapman 2013).

### 2.1.3 Controle de Tensão e Potência Reativa

A análise de fluxo de potência não se limita a calcular o estado da rede, mas também a estudar os meios de controlá-lo. O controle de tensão é um dos serviços auxiliares mais importantes para garantir a operação segura e eficiente do SEP. A principal variável de controle é a **potência reativa** (Grainger e Stevenson 1994).

Os principais equipamentos utilizados para este fim são:

- **Geradores Síncronos:** Através de seus Reguladores Automáticos de Tensão (AVR), os geradores ajustam sua produção ou absorção de reativos para manter a tensão

em seu terminal em um valor pré-especificado, conforme modelado pelas barras PV e limitado por sua curva de capacidade.

- **Comutadores de Taps (LTCs):** Os LTCs de transformadores ajustam a relação de espiras para regular a tensão no secundário, controlando o fluxo de potência reativa através do transformador.

A modelagem correta desses elementos de controle nos softwares de simulação é essencial para analisar a capacidade da rede de manter um perfil de tensão adequado sob diferentes condições de carga.

## 2.2 Modelagem para Estudos de Curto-Círcuito

O cálculo de correntes de curto-círcuito é fundamental para o dimensionamento da capacidade de interrupção de disjuntores e para o ajuste de relés de proteção (Sato e Freitas 2015). A metodologia padrão, consolidada em normas como a **IEC 60909** (International Electrotechnical Commission 2001), baseia-se na aplicação do Teorema de *Thévenin* no ponto da falta, utilizando o método das Componentes Simétricas para analisar defeitos desequilibrados. De forma distinta do regime permanente, a análise de faltas exige modelos que capturem o comportamento dos equipamentos nos primeiros instantes do distúrbio.

### 2.2.1 O Método das Componentes Simétricas

Desenvolvido por Charles LeGeyt Fortescue, o Teorema das Componentes Simétricas (Fortescue 1918) permite que um sistema trifásico desequilibrado seja decomposto em três sistemas de fasores equilibrados: o de sequência positiva, o de sequência negativa e o de sequência zero (Sato e Freitas 2015).

- **Componentes de Sequência Positiva ( $Z_1$ ):** Consistem em três fasores de igual magnitude, defasados de 120° entre si, com a mesma sequência de fase da rede original (e.g., ABC). Eles representam o comportamento do sistema em operação normal e equilibrada.
- **Componentes de Sequência Negativa ( $Z_2$ ):** Também possuem igual magnitude e defasagem de 120°, porém com a sequência de fase invertida (e.g., ACB). Estão associados a campos girantes reversos em máquinas elétricas e só aparecem sob condições de desequilíbrio.
- **Componentes de Sequência Zero ( $Z_0$ ):** Consistem em três fasores de igual magnitude e em fase entre si. Estas componentes só existem se houver um caminho de

retorno para a corrente, tipicamente através do neutro ou da terra. Portanto, são fundamentais para a análise de curtos-circuitos que envolvem a terra (Kindermann 1997).

A grande vantagem deste método é que, em cada uma das redes de sequência, o sistema é equilibrado, permitindo uma análise monofásica. Para um determinado tipo de falta (e.g., fase-terra, fase-fase-terra), as três redes de sequência são interconectadas de uma maneira específica no ponto do defeito, permitindo o cálculo das correntes de falta desequilibradas (Grainger e Stevenson 1994).

### 2.2.2 Aspectos da Norma IEC 60909

A norma **IEC 60909** (International Electrotechnical Commission 2001) estabelece um procedimento prático e padronizado para o cálculo de correntes de curto-circuito. Sua metodologia baseia-se em simplificações que garantem um resultado conservador e seguro para o dimensionamento de equipamentos. Alguns de seus conceitos centrais são:

- **Fonte de Tensão Equivalente:** A norma assume que todas as fontes de falta (geradores, motores) e a rede são substituídas por uma única fonte de tensão equivalente no ponto da falta. A impedância vista por esta fonte é a impedância de Thévenin de curto-circuito.
- **Fator de Tensão ( $c$ ):** Para o cálculo da corrente máxima, a norma introduz um fator de tensão ( $c_{max}$ ) que eleva a tensão pré-falta nominal. Esse fator considera as variações de tensão permitidas na operação normal do sistema (e.g., +5% ou +10%) e a ação dos comutadores de tap, garantindo que o cálculo represente o pior caso possível. Para o cálculo da corrente mínima, utiliza-se um fator  $c_{min}$  (Sato e Freitas 2015).
- **Correntes Calculadas:** A norma define o cálculo de diversas correntes, cada uma com uma finalidade:
  - **Corrente Simétrica Inicial ( $I''_k$ ):** É a corrente RMS no instante inicial da falta, calculada com as reatâncias subtransitórias. É usada para determinar o esforço de interrupção dos disjuntores.
  - **Corrente de Pico ( $i_p$ ):** É o valor de crista da primeira senóide da corrente de falta, que inclui o efeito da componente DC assimétrica. É a corrente de maior magnitude e serve para dimensionar os esforços eletromecânicos (barramentos, isoladores) (Kindermann 1997).
  - **Corrente Simétrica de Interrupção ( $I_b$ ):** Representa o valor RMS da corrente no instante de separação dos contatos do disjuntor, considerando o decaimento da componente DC.

- **Corrente de Regime Permanente ( $I_k$ ):** É a corrente após o decaimento de todos os transitórios, usada para o ajuste de proteções de retaguarda.

A correta parametrização dos modelos nos softwares, seguindo as diretrizes da norma, é o que garante a precisão e a validade desses cálculos.

#### 2.2.3 Máquinas Girantes (Geradores e Motores)

Durante um curto-círcuito, as máquinas girantes são as principais fontes que contribuem com corrente para o ponto de falta. Diferente de uma análise em regime permanente, seu comportamento é dinâmico, pois injetam na rede a energia armazenada em seus campos magnéticos e em sua inércia rotacional (Kindermann 1997). A modelagem correta deste comportamento transitório é essencial para determinar os esforços máximos nos equipamentos do sistema.

- **Contribuição Inicial:** O fenômeno transitório em máquinas síncronas se deve à lei da conservação do fluxo concatenado. No instante da falta, a corrente do estator aumenta abruptamente para se opor à variação do fluxo magnético. Essa oposição inicial é oferecida pelos enrolamentos de amortecimento e pelo próprio corpo do rotor, sendo representada pela **reatância subtransitória ( $X_d''$ )**. Este é o menor valor de reatância e, portanto, define a maior magnitude de corrente, que é crítica para o dimensionamento da capacidade de interrupção dos disjuntores (Kindermann 1997).
- **Decaimento da Corrente:** Após o instante inicial, a energia presa nos enrolamentos de amortecimento se dissipa rapidamente. A contribuição de corrente passa a ser sustentada pelo enrolamento de campo, cujo fluxo decai mais lentamente. Este período é representado pela **reatância transitória ( $X_d'$ )**. Finalmente, a corrente atinge um valor de **regime permanente**, sustentado pela excitação da máquina e limitado pela **reatância síncrona ( $X_d$ )**. A dinâmica desse decaimento é governada pelas constantes de tempo da máquina ( $T_{do}''$ ,  $T_{do}'$ ) (Kindermann 1997).

#### 2.2.4 Componentes Estáticos (Linhas e Transformadores)

Diferentemente das máquinas girantes que contribuem ativamente para a corrente de falta, os componentes estáticos formam a malha da rede e seu principal efeito é o de limitar a magnitude da corrente por meio de suas impedâncias. Para a análise, eles são representados por suas impedâncias de sequência positiva ( $Z_1$ ), negativa ( $Z_2$ ) e zero ( $Z_0$ ) (Sato e Freitas 2015), sendo seus papéis específicos:

- **Linhas de Transmissão:** Atuam como o principal elemento limitador da corrente de curto-círcuito na rede. Sua impedância série é diretamente proporcional à distância,

fazendo com que a magnitude da corrente de falta seja naturalmente atenuada em pontos eletricamente distantes das fontes de geração (Kindermann 1997).

- **Transformadores:** Além de limitarem a corrente com sua impedância de dispersão, sua modelagem é crítica para a análise de faltas envolvendo a terra. A **impedância de sequência zero ( $Z_0$ )** do transformador, definida por seu grupo de ligação (e.g., Dyn1) e pela construção do núcleo, determina se haverá um caminho para a circulação da corrente de falta monofásica. Uma modelagem incorreta deste parâmetro invalida o cálculo de faltas à terra e, consequentemente, o ajuste das proteções associadas (Kindermann 1997).

### 2.3 Modelagem para Estudos de Proteção e Seletividade

A proteção de SEP engloba um conjunto de dispositivos e lógicas projetadas para detectar condições anormais, como curtos-circuitos ou sobrecargas, e isolar o trecho defeituoso da rede de forma rápida e seletiva. Existem diversos princípios de proteção, como o diferencial, o de distância e o de sobrecorrente, cada um adequado a diferentes aplicações e zonas de proteção.

Embora funções como a proteção diferencial sejam primordiais para defeitos internos em equipamentos como transformadores, a proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos externos frequentemente se baseia no princípio da sobrecorrente (funções 50, 50N, 51 e 51N). É neste contexto que a modelagem dos limites de suportabilidade dos equipamentos se torna essencial. Essa abordagem é coordenada visualmente através de um diagrama Tempo vs. Corrente (TCC), onde se busca garantir a atuação para defeitos sem causar desligamentos por condições operacionais transitórias, porém normais.

Para construir este diagrama de forma segura, é preciso definir um "corredor de atuação" para o relé. Esse corredor é delimitado por duas fronteiras fundamentais:

- **Curva de Dano Térmico (Limite Superior):** Representa a suportabilidade de um equipamento a uma sobrecorrente, um conceito baseado na relação  $I^2t$ . O calor gerado por uma corrente elevada degrada a isolação dos enrolamentos, que é o componente mais sensível de transformadores e motores. Definida por normas (e.g., **ANSI/IEEE C57.109 para transformadores**) (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2018), ela expressa o tempo máximo que um ativo pode suportar uma dada corrente antes de sofrer danos permanentes. A curva de atuação do relé deve sempre estar abaixo desta fronteira para garantir a integridade do ativo (Mardegan 2022).
- **Correntes de Partida e Inrush (Limite Inferior):** A corrente de partida de um motor e a corrente de magnetização (*inrush*) de um transformador são fenômenos transitórios de alta magnitude que não representam um defeito. O *inrush* em transformadores,

por exemplo, ocorre devido à saturação do núcleo magnético no momento da energização e é caracterizado por uma forma de onda assimétrica e rica em harmônicos, especialmente o de segunda ordem (Chapman 2013). Elas definem uma zona de "não atuação", e a proteção deve ser ajustada com uma temporização maior que a duração desses eventos para evitar disparos indevidos e garantir a continuidade operacional (Mardegan 2022).

## 2.4 Conclusão do Capítulo

Os fundamentos teóricos apresentados neste capítulo — desde a representação de barras e impedâncias até a modelagem de transitórios e curvas de dano — não são apenas conceitos abstratos, mas sim a base de dados sobre a qual todo estudo de simulação é construído.

Contudo, a verdadeira diferenciação entre as plataformas de software não reside na teoria em si, mas em *como* elas traduzem esses conceitos em uma ferramenta de trabalho para o engenheiro. Questões como a organização dos dados, a flexibilidade de modelagem e a transparência na aplicação de normas são os fatores que definem a filosofia, a usabilidade e a adequação de cada software. O capítulo seguinte mergulha nesta análise prática, investigando como o *DigSILENT PowerFactory*, o *ETAP* e o *PTW* implementam, na prática, a teoria aqui discutida.

### **3 METODOLOGIA E MODELAGEM COMPARATIVA**

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para a análise e comparação dos softwares DIgSILENT *PowerFactory*, ETAP e PTW. Para fundamentar a avaliação em cenários práticos e relevantes, a análise será baseada na modelagem de um estudo de caso principal, composto pelos quatro ativos de maior relevância técnica e econômica em um Sistema Elétrico de Potência (SEP).

A abordagem metodológica adotada consistirá em, primeiramente, detalhar o processo de modelagem de cada um destes quatro componentes fundamentais. Cada ativo será analisado individualmente nas três plataformas de software, destacando as particularidades de suas interfaces, filosofias de trabalho e ferramentas disponíveis. A utilização de dados de equipamentos comerciais reais, obtidos a partir de folhas de dados de fabricantes, garantirá a veracidade e a aplicação prática da comparação.

Dessa forma, o capítulo está organizado da seguinte maneira:

- 1. Modelagem Comparativa de Geradores Síncronos;**
- 2. Modelagem Comparativa de Linhas de Transmissão;**
- 3. Modelagem Comparativa de Transformadores de Força;**
- 4. Modelagem Comparativa de Motores de Indução.**

A análise detalhada de cada componente servirá como base para o capítulo de resultados, onde as funcionalidades serão consolidadas em um quadro comparativo e uma conclusão crítica será apresentada.

#### **3.1 Fluxograma Metodológico**

O processo de análise, que foi aplicado de forma consistente para cada ativo, seguiu uma sequência lógica de etapas, desde a coleta de dados de equipamentos comerciais até a análise crítica das funcionalidades de cada plataforma. O fluxograma apresentado na Figura 1 ilustra visualmente esta metodologia de trabalho.



**Figura 1 – Fluxograma do processo metodológico de análise comparativa**

Fonte: O autor.

### **1. Início da Metodologia de Análise Comparativa**

- *Descrição:* Ponto de partida formal do processo de avaliação estruturada das três plataformas de software (DlgsILENT PowerFactory, ETAP e PTW).

### **2. Seleção do Ativo Elétrico**

- *Descrição:* Nesta etapa, um dos quatro componentes fundamentais do SEP é selecionado para o ciclo de análise. O processo foi executado de forma sequencial, iniciando com o Gerador Síncrono e prosseguindo, para a Linha de Transmissão, Transformador de Força e finalmente o Motor de Indução.

### **3. Ciclo de Modelagem e Parametrização**

- *Descrição:* Esta é a etapa central da execução prática do trabalho. Para o ativo selecionado na etapa anterior, o processo inicia-se com a **definição de um estudo de caso**, utilizando dados técnicos de um equipamento comercial real, obtidos a partir de sua folha de dados (*datasheet*). Em seguida, o mesmo conjunto de dados é utilizado para realizar a **modelagem e parametrização do ativo nas três plataformas de software**, seguindo os procedimentos específicos de cada uma:

- **Modelagem no DgSILENT PowerFactory:** Inserção dos dados do estudo de caso, explorando a estrutura de dados da plataforma e sua filosofia de trabalho (e.g., a separação entre Tipo e Elemento).
- **Modelagem no ETAP:** Inserção dos mesmos dados, analisando a organização da interface em páginas e o uso de ferramentas auxiliares integradas (e.g., *Typical Data*).
- **Modelagem no PTW:** Inserção dos mesmos dados, com foco na análise da interface, sua estrutura em sub-vistas e sua abordagem para a aplicação de normas.

#### **4. Análise Comparativa Parcial**

- *Descrição:* Com o ativo modelado nas três plataformas, é realizada uma análise crítica e imparcial. Esta análise compara critérios como a filosofia de trabalho, a flexibilidade de modelagem, a usabilidade da interface e o rigor técnico. Os resultados desta avaliação são consolidados em um Quadro Comparativo e em um texto conclusivo específico para o componente em questão.

#### **5. Decisão: Existem mais ativos a serem analisados?**

- *Descrição:* Este é o ponto de controle do processo metodológico. Uma verificação é feita para determinar se todos os quatro ativos já foram submetidos ao ciclo de análise.
  - **Se [NÃO]:** O fluxo de trabalho prossegue para a etapa de consolidação final.
  - **Se [SIM]:** O processo retorna à Etapa 2 para a seleção do próximo ativo da lista, reiniciando o ciclo de análise.

#### **6. Consolidação e Conclusão Geral**

- *Descrição:* Com o ciclo de análise concluído para todos os quatro ativos, as conclusões parciais obtidas na Etapa 4 para cada componente são agrupadas, comparadas e sintetizadas. Esta etapa resulta na avaliação comparativa geral das plataformas, que é apresentada no Capítulo 4 do trabalho, destacando os pontos fortes e as aplicações ideais de cada software.

### 3.2 Geradores

Os geradores elétricos são elementos de importância fundamental para qualquer sistema elétrico de potência. Sua relevância reside no fato de serem as fontes primárias que injetam a energia necessária para suprir as cargas, funcionando como o coração de toda a rede. De acordo com (Umans 2014), a função essencial de um gerador é converter energia mecânica em energia elétrica por meio do fenômeno da indução eletromagnética. Dada a sua criticidade para a operação do sistema, a representação fidedigna de seu comportamento dinâmico é crucial. Por isso, a correta modelagem dos geradores em softwares de simulação, como o ETAP, PTW e o *DIGSILENT PowerFactory*, torna-se indispensável para a realização de estudos de fluxo de potência, estabilidade e curto-círcuito que refletem as condições reais da rede (Grainger e Stevenson 1994).

#### 3.2.1 Definição do Estudo da Caso Modelagem

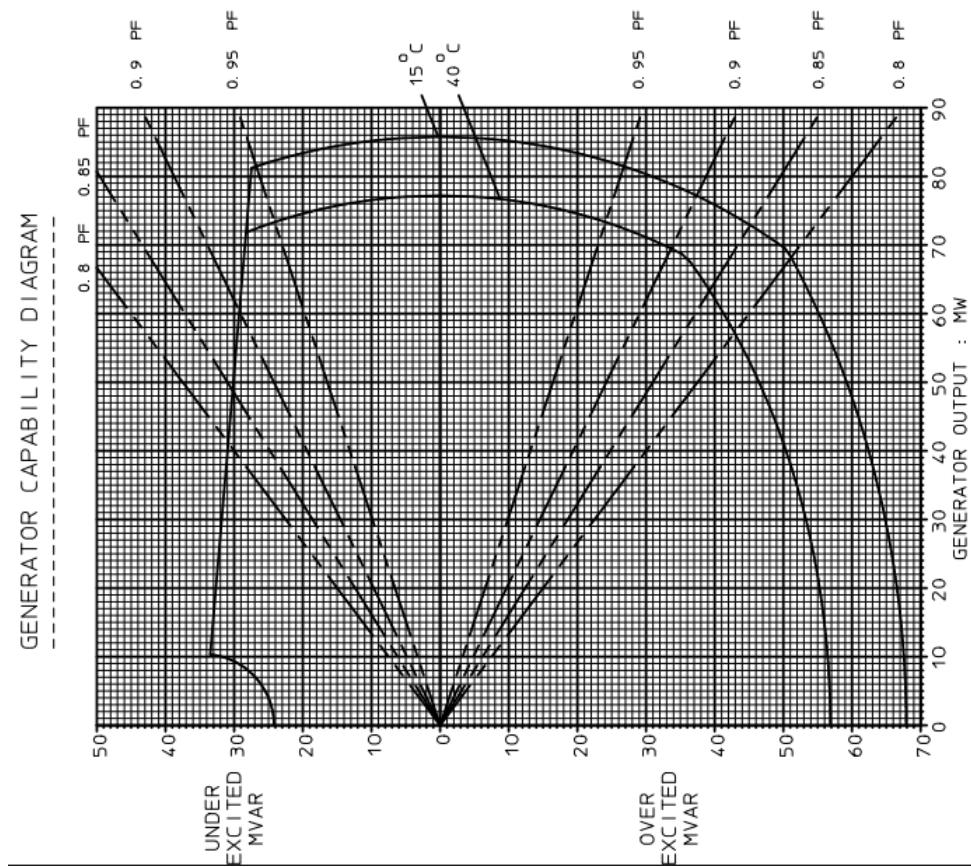
Para a análise comparativa da modelagem de geradores síncronos, foi selecionado um estudo de caso baseado em um equipamento real. Serão utilizados os dados técnicos de um gerador **BRUSH**, modelo **BDAX 72-290ER**, com potência nominal de **70.528 MW** e tensão de **13.8 kV**. As informações foram extraídas da folha de dados elétricos do fabricante, datada de 21 de junho de 2011, que serve como fonte para os parâmetros de entrada nas três plataformas de software. A Tabela 1 consolida as principais características elétricas e mecânicas deste gerador que são pertinentes aos estudos de fluxo de potência, curto-círcuito e proteção.

**Tabela 1 – Características Elétricas e Mecânicas do Gerador BRUSH BDAX 72-290ER.**

Parâmetro	Valor
<b>Dados Nominais</b>	
Potência Nominal	70.528 MW / 82.974 MVA
Tensão nos Terminais	13.80 kV
Fator de Potência	0.850
Frequência	60 Hz
Velocidade	3600 rpm
<b>Reatâncias (em % na base própria)</b>	
Síncrona de Eixo Direto ( $X_d$ )	240 %
Síncrona de Eixo em Quadratura ( $X_q$ )	220 %
Transiente Saturada de Eixo Direto ( $X'_{d(v)}$ )	24.6 %
Subtransitória Saturada de Eixo Direto ( $X''_{d(v)}$ )	17.6 %
De Sequência Negativa ( $X_2$ )	22.4 %
De Sequência Zero ( $X_0$ )	12.0 %
Relação de Curto-Circuito (SCR)	0.45
<b>Constantes de Tempo (a 20°C)</b>	
Transiente em Aberto ( $T'_{do}$ )	9.3 s
Subtransitória em Aberto ( $T''_{do}$ )	0.05 s
<b>Resistências (a 20°C)</b>	
Resistência do Estator (por fase)	0.0028 Ω
Resistência do Rotor	0.156 Ω

Fonte: Elaborado pelo autor, com base na folha de dados da BRUSH  
(BRUSH Electrical Machines Ltd 2012).

Um dos diagramas mais importantes que definem a operação de um gerador síncrono é a sua **curva de capacidade**. Esta curva delimita a região segura de operação da máquina em termos de potência ativa (MW) e reativa (MVar), definindo os limites operacionais que não devem ser ultrapassados para garantir a integridade do equipamento (Chapman 2013). Esses limites são impostos por diferentes fatores: o aquecimento do enrolamento do estator (limite de MVA), o aquecimento do enrolamento de campo do rotor (limite de sobre-excitación), a potência máxima da turbina (limite de MW) e a estabilidade ou aquecimento da extremidade do núcleo (limite de sub-excitación). A Figura 2 apresenta a curva de capacidade para o gerador BRUSH do estudo de caso, conforme extraído de sua folha de dados (BRUSH Electrical Machines Ltd 2012).

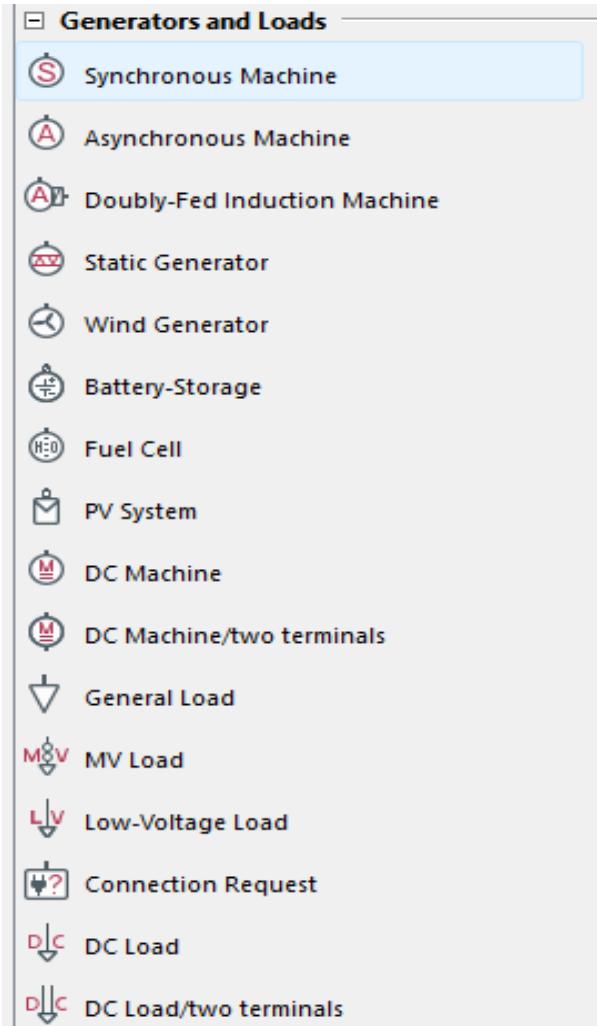


**Figura 2 – Curva de Capabilidade do gerador BRUSH BDAX 72-290ER.**

**Fonte:** (BRUSH Electrical Machines Ltd 2012).

### 3.2.2 Modelagem de Geradores no DIgSILENT PowerFactory

A modelagem de geradores síncronos no DIgSILENT PowerFactory é realizada através do elemento **Máquina Síncrona (Synchronous Machine)**, identificado como ElmSym. A plataforma adota uma filosofia de dois níveis que separa os dados técnicos do objeto físico: o **Tipo (TypSym)**, que funciona como um "template" com os dados de engenharia, e o **Elemento (ElmSym)**, que é a instância da máquina no diagrama unifilar. A Figura 3 ilustra a localização do elemento na paleta de ferramentas.



**Figura 3 – Localização do elemento Gerador Síncrono na *Drawing Tools*.**

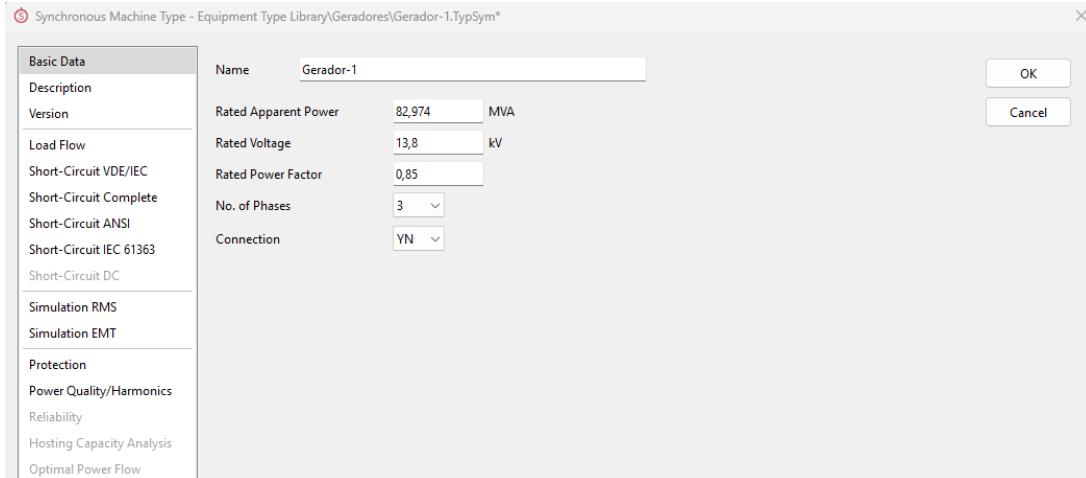
**Fonte:** O autor.

### 3.2.2.1 Configuração do Tipo de Máquina (TypSym)

A configuração do Tipo é a etapa mais detalhada, pois envolve a inserção de todos os dados técnicos que definem o comportamento físico e elétrico da máquina.

#### *3.2.2.1.1 Aba Basic Data*

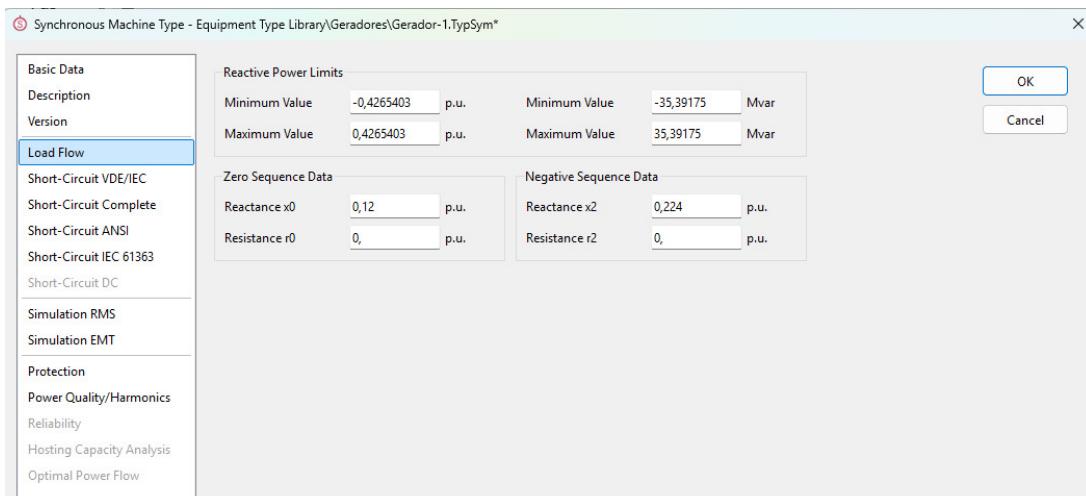
Nesta interface (Figura 4), são inseridos os dados de placa do gerador, como a **Potência Aparente Nominal (MVA)**, a **Tensão Nominal (kV)**, o **Fator de Potência Nominal** e o tipo de **Conexão** dos enrolamentos (ex: Estrela Aterrada - YN).



**Figura 4 – Interface de parâmetros básicos no Tipo de Gerador Síncrono (TypSym).**  
Fonte: O autor.

### 3.2.2.1.2 Aba Load Flow

Nesta aba (Figura 5), definem-se os **Límites de Potência Reativa** ( $Q_{min}, Q_{max}$ ), extraídos da curva de capacidade, e as **impedâncias de sequência zero** ( $Z_0$ ) e **negativa** ( $Z_2$ ), parâmetros cruciais para a análise de faltas desequilibradas.

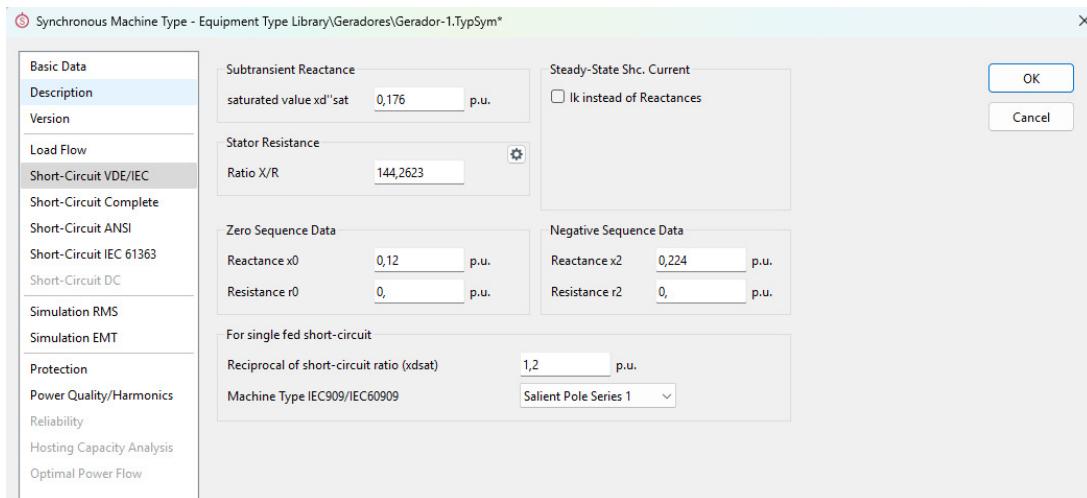


**Figura 5 – Interface de parâmetros de Fluxo de Potência no Tipo (TypSym).**  
Fonte: O autor.

### 3.2.2.1.3 Aba Short-Circuit VDE/IEC

Aqui (Figura 6), são parametrizados os dados para estudos de curto-circuito conforme a norma IEC 60909. Os dados essenciais são a **reatância subtransitória saturada** ( $x_d''_{sat}$ ), para o cálculo da corrente inicial ( $I_k''$ ), e o inverso da relação de curto-circuito ( $xdsat$ ), para a

corrente de regime permanente ( $I_k$ ). A seleção do **Tipo de Máquina** (ex: *Salient Pole*) também é fundamental, pois ajusta o cálculo da corrente de pico assimétrica ( $i_p$ ).

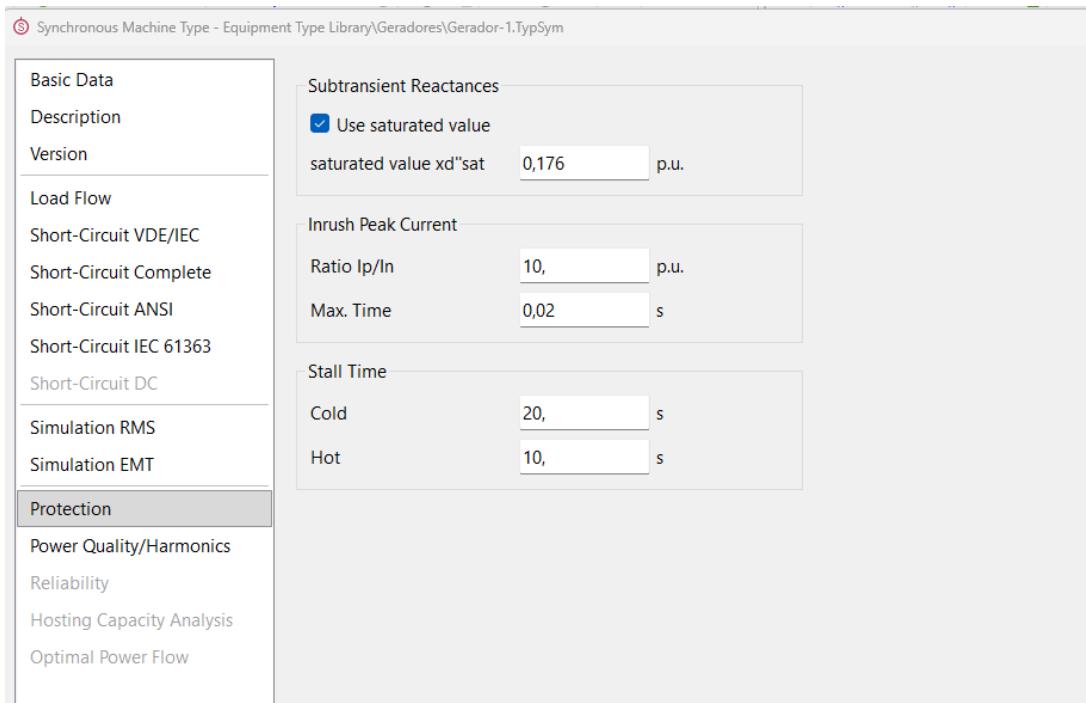


**Figura 6 – Interface de parâmetros de Curto-Circuito no Tipo (TypSym).**

**Fonte:** O autor.

### 3.2.2.1.4 Aba Protection e Curva de Dano Térmico

A aba **Protection** (Figura 7) do Tipo de Gerador Síncrono é dedicada à definição dos limites que formam a sua **curva de dano térmico**. Diferentemente de outros equipamentos onde a curva é inserida ponto a ponto, para uma máquina síncrona, esta curva é **calculada implicitamente pelo software**, com base nos parâmetros fundamentais da máquina (reatâncias, constantes de tempo, etc.), seguindo as diretrizes de normas como a ANSI/IEEE C50.13. Ela representa a capacidade de suportabilidade do gerador a correntes de sobrecarga e de falta externa, e o principal parâmetro de entrada explícito nesta aba é o **Tempo de Rotor Bloqueado (Stall Time)**, que define o limite térmico crítico do rotor.



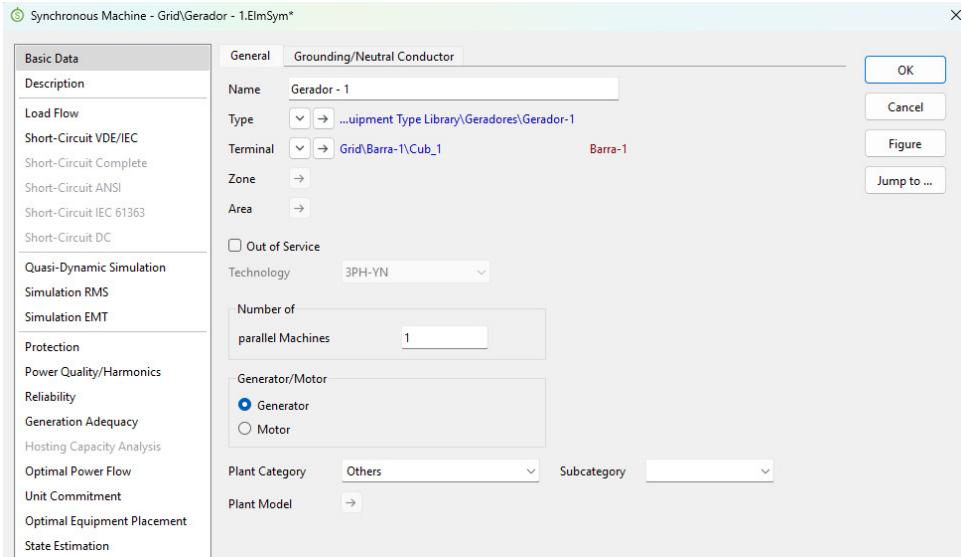
**Figura 7 – Interface de configuração para a curva de dano no Tipo (TypSym)**  
**Fonte:** O autor.

### 3.2.2.2 Configuração do Elemento no Diagrama (ElmSym)

Com o Tipo definido, a configuração do Elemento na rede foca-se em seus dados operacionais e de controle.

#### *3.2.2.2.1 Aba Basic Data*

Esta aba (Figura 8) funciona como o painel de identidade do gerador. Nela, o elemento é vinculado ao seu respectivo **Tipo (TypSym)** e são definidas configurações de instalação, como o **número de máquinas em paralelo** e o método de **aterramento do neutro**.



**Figura 8 – Interface de parametrização da Aba *Basic Data* do ElmSym.**

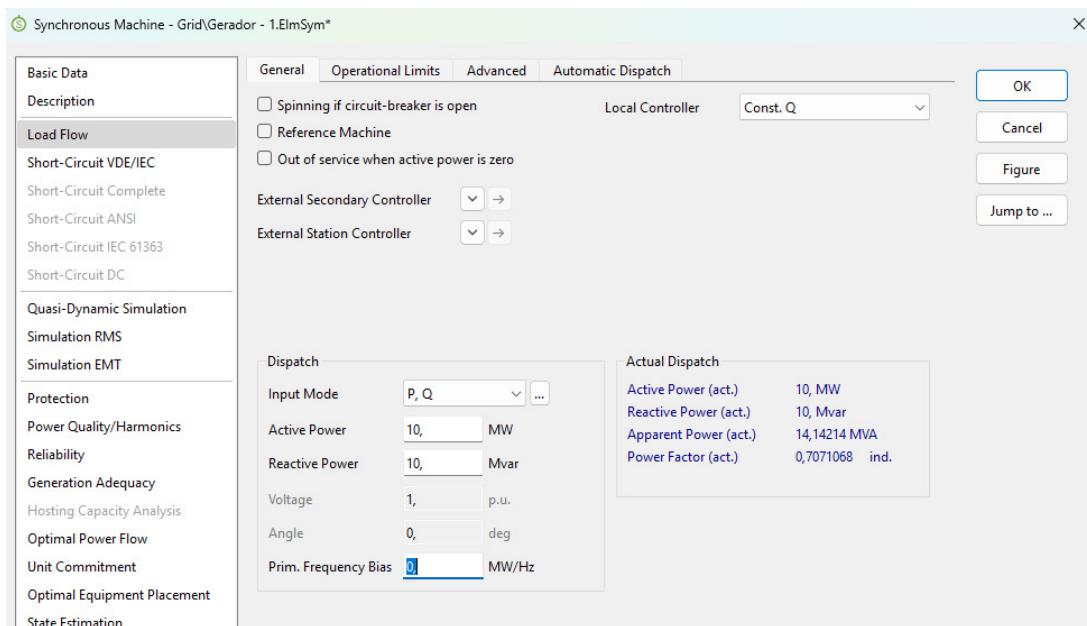
**Fonte:** O autor.

### 3.2.2.2.2 Aba Load Flow (do Elemento)

A aba **Load Flow** do elemento ElmSym (Figura 9) é o painel de controle operacional do gerador para o estudo de fluxo de potência. Nela, o usuário define o despacho de potência e o modo de regulação de tensão, com as seguintes seções principais:

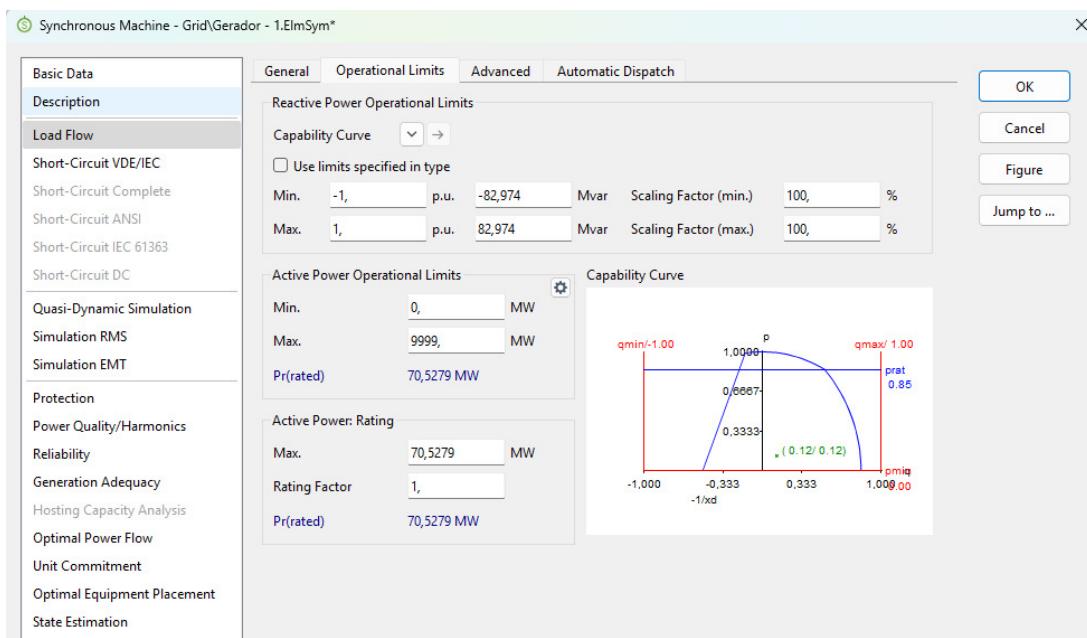
- **Dispatch (Despacho):** Esta seção define o ponto de operação do gerador no estudo de fluxo de potência. O **Modo de Entrada (Input Mode)** determina quais variáveis são especificadas pelo usuário; nos modos mais comuns, define-se a **Potência Ativa (P)** e a **Potência Reativa (Q)** (barra PQ), ou a **Potência Ativa (P)** e a **Magnitude da Tensão (V)** a ser controlada no terminal (barra PV). Uma exceção crucial ocorre quando a máquina é designada como a **referência do sistema (Reference Machine ou Slack Bus)**. Nesta condição, os seus *setpoints* de P e Q são ignorados; em vez disso, a **Tensão (V)** e o **Ângulo ( $\delta$ )** são os parâmetros fixados (geralmente 1.0 p.u. e 0 graus), e as potências P e Q são **calculadas pelo software** para balancear as perdas totais da rede.
- **Local Controller (Controle Local):** Determina o modo de regulação de tensão na barra em que o gerador está conectado. As opções mais utilizadas permitem que a máquina opere em Controle de Tensão (modo PV), Fator de Potência constante (Const. PF) ou Potência Reativa constante (Const. Q).
- **Operational Limits (Limites Operacionais):** Nesta sub-aba (Figura 10), a **Curva de Capabilidade** é visualizada. Por padrão, ela é herdada dos parâmetros definidos no **Tipo (TypSym)**, mas também é possível que o usuário insira manualmente limites

de potência reativa específicos para aquele elemento, permitindo simular condições operacionais reais.



**Figura 9 – Interface de configuração de Fluxo de Potência no Elemento (ElmSym).**

**Fonte:** O autor.



**Figura 10 – Interface de Limites Operacionais e curva de capacidade no Elemento.**

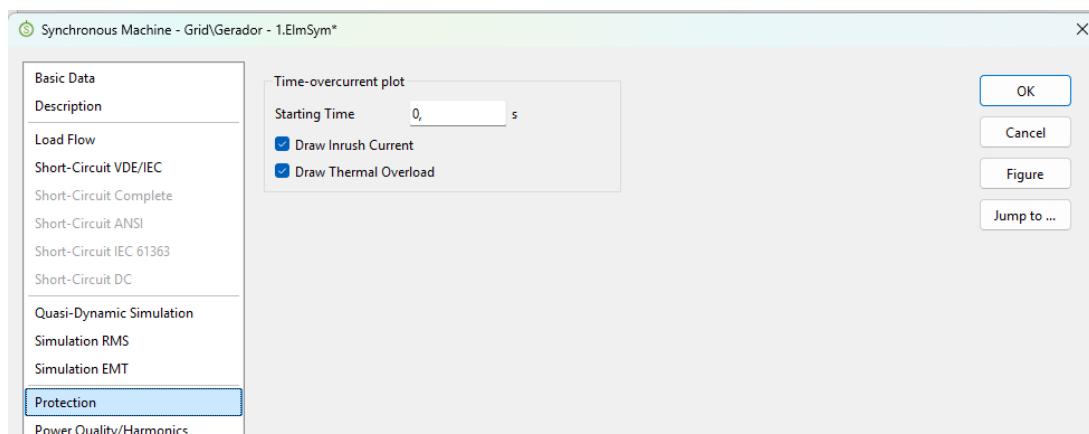
**Fonte:** O autor.

### 3.2.2.2.3 Configuração do Elemento Gerador para Curto-Círcuito

A aba **Short-Circuit VDE/IEC** do elemento Gerador (ElmSym) permite ao usuário definir condições operacionais específicas da máquina para o cálculo de curto-círcito. O parâmetro '**Range of Voltage Regulation**' (Faixa de Regulação de Tensão) é utilizado para especificar a capacidade de regulação (em %) do Regulador Automático de Tensão (AVR) do gerador. Ao fornecer este dado, o DIgSILENT PowerFactory calcula um **fator de correção de tensão "c"** mais preciso, conforme a norma IEC 60909, resultando em uma tensão pré-falta customizada para a máquina. Na ausência de dados específicos, deixar este campo como zero (padrão) faz com que o software utilize o fator "c" genérico da norma, uma abordagem conservadora e adequada para a maioria dos estudos acadêmicos.

### 3.2.2.2.4 Aba Protection

A aba de proteção do elemento (Figura 11) gerencia como os limites do gerador (definidos no Tipo) são exibidos no gráfico tempo-corrente (TCC) para a coordenação com relés. As opções permitem plotar a **curva de dano térmico (Draw Thermal Overload)** e a **restrição da corrente de inrush (Draw Inrush Current)**, ferramentas visuais essenciais para o ajuste seguro e seletivo da proteção.

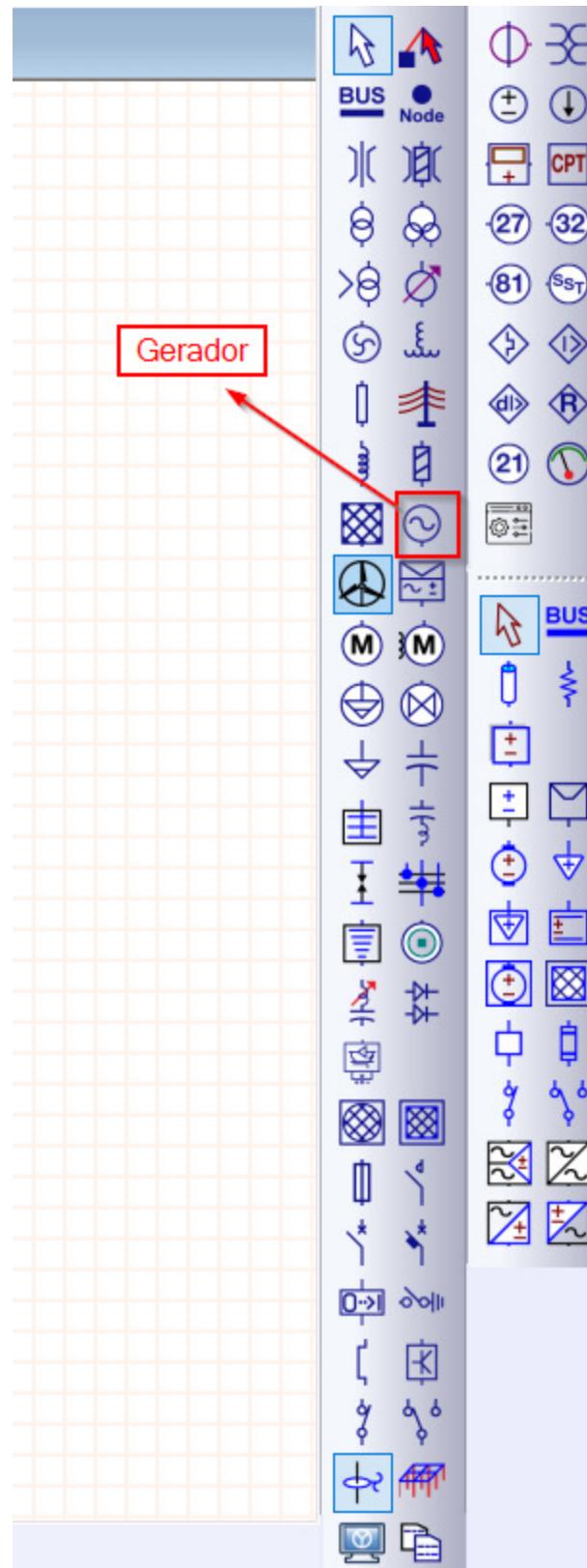


**Figura 11 – Interface de opções de visualização de proteção no Elemento (ElmSym).**

**Fonte:** O autor.

### 3.2.3 Modelagem de Geradores no ETAP

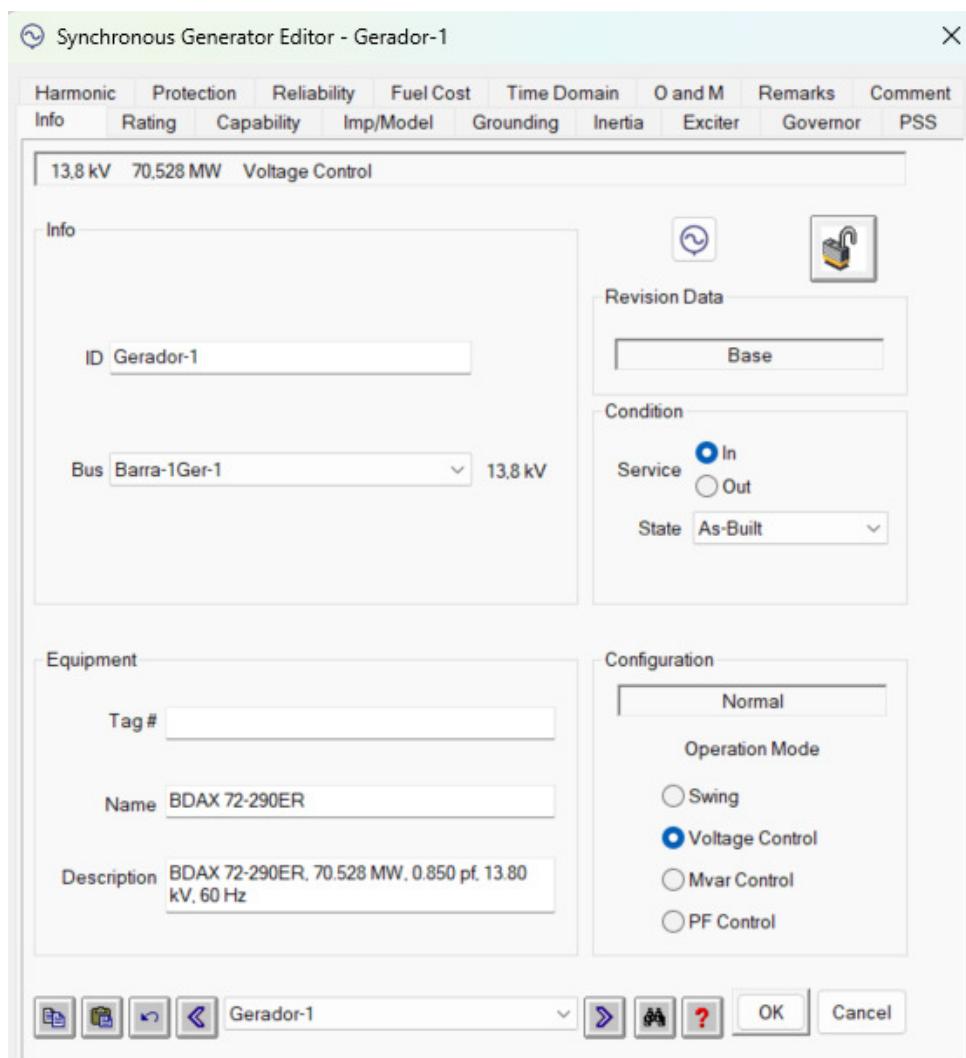
O software ETAP oferece uma biblioteca robusta de componentes, incluindo diversas máquinas elétricas girantes como geradores e motores síncronos e de indução. Para este trabalho, o foco é a modelagem do gerador síncrono, cujos parâmetros são configurados através de uma interface organizada em páginas, o local onde é encontrado este componente é demonstrado na Figura 12.



**Figura 12 – Localização do elemento gerador síncrono na biblioteca do ETAP.**  
**Fonte:** O autor.

Ao inserir um gerador no diagrama unifilar, a primeira janela de diálogo apresentada é a de informações gerais (Figura 13). Um diferencial do ETAP é a solicitação dos campos **ID** e

TAG, que permitem a criação de uma identidade única para cada componente, facilitando sua identificação e gerenciamento em projetos complexos.



**Figura 13 – Interface inicial de informações do gerador no ETAP.**

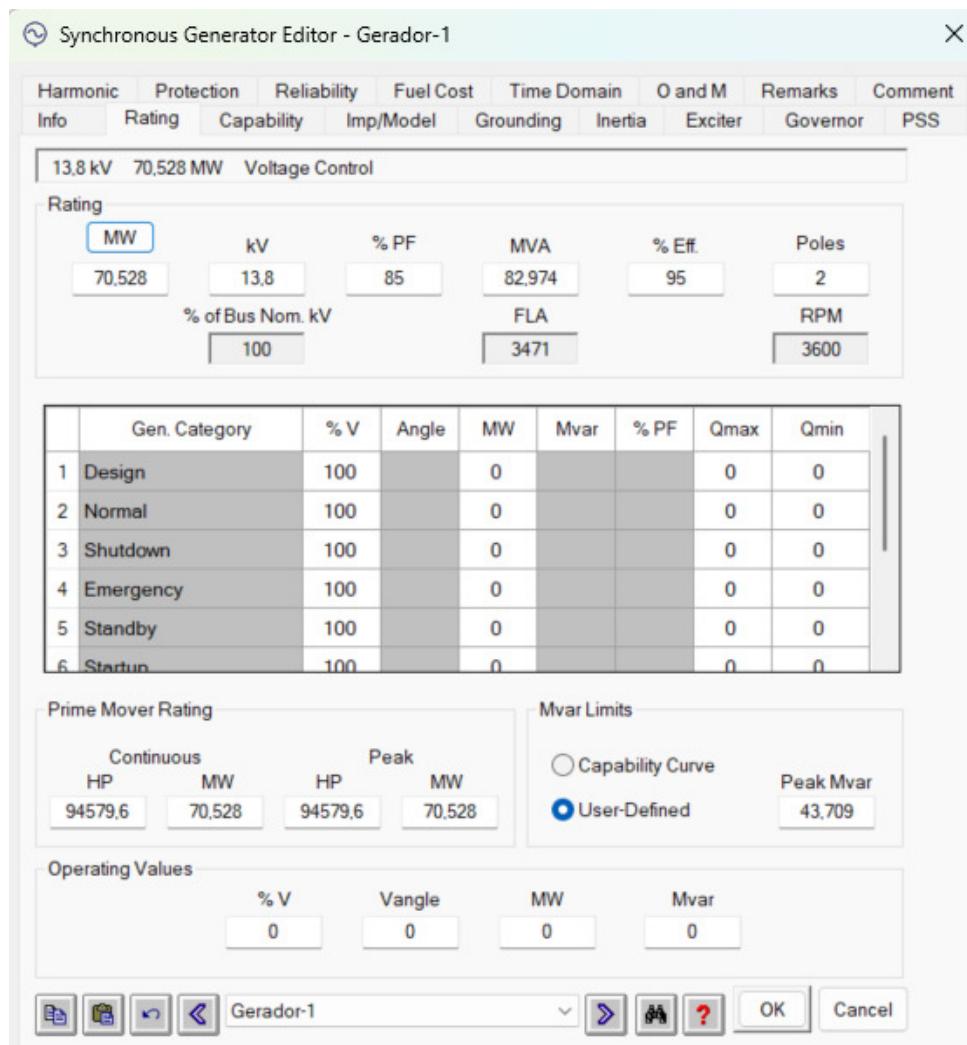
**Fonte:** O autor.

Para os estudos de fluxo de potência, curto-circuito e proteção, as principais abas de configuração a serem detalhadas são *Rating*, *Capability*, *Imp/Model* e *Protection*.

### 3.2.3.1 Página de Dados Nominais (Rating)

A aba *Rating* é onde o usuário insere os dados de placa da máquina, como potência aparente (*MVA*), tensão nominal (*kV*), fator de potência, eficiência e número de polos. Além dos limites físicos, esta seção define o comportamento do gerador nos estudos através das "Categorias de Geração". É possível configurar múltiplos perfis operacionais, definindo o modo de controle da máquina como **Swing** (para balancear a rede), **Voltage Control (PV)** (para regular a tensão em seu terminal), ou como fonte de potência fixa nos modos **Mvar Control (PQ)** ou

**Power Factor Control.** As Figuras 14 e 15 ilustram a configuração para os modos de controle de tensão e swing, respectivamente.



**Figura 14 – Interface com o gerador configurado no modo *Voltage Control* (PV).**  
Fonte: O autor

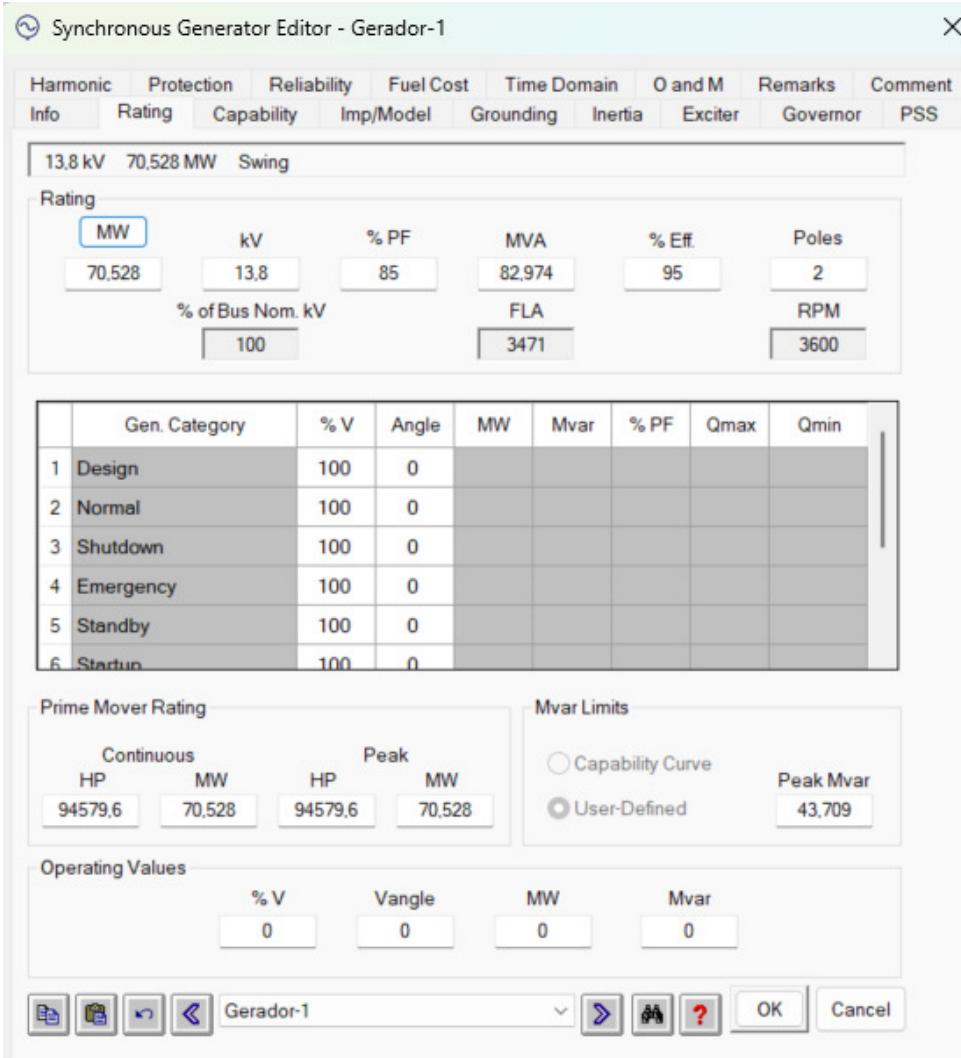
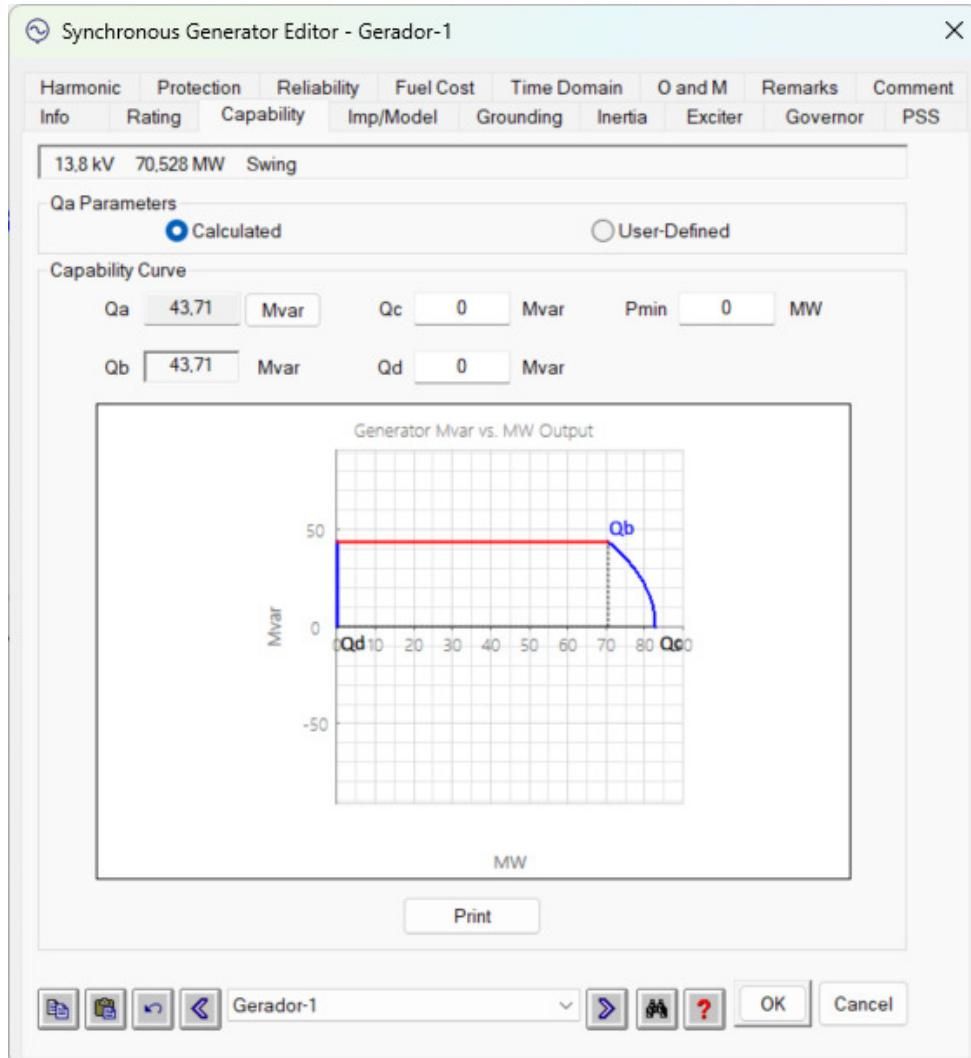


Figura 15 – Interface com o gerador configurado no modo *Swing* (referência da rede).

Fonte: O autor.

### 3.2.3.2 Página de Curva de Capabilidade (*Capability*)

Nesta página (Figura 16), o software exibe a curva de capacidade do gerador, que é traçada automaticamente com base nos dados inseridos na aba *Rating*. A curva delimita a região segura de operação P-Q da máquina, definida pelos seguintes pontos-chave:  $Q_a$  (limite de excitação),  $Q_b$  (potência reativa nominal),  $Q_c$  (interseção do limite de MVA com o de estabilidade),  $Q_d$  (limite de estabilidade em subexcitação) e  $P_{min}$  (potência ativa mínima). O gráfico é interativo, permitindo ao usuário inspecionar os valores nos pontos de interesse e exportar a curva.

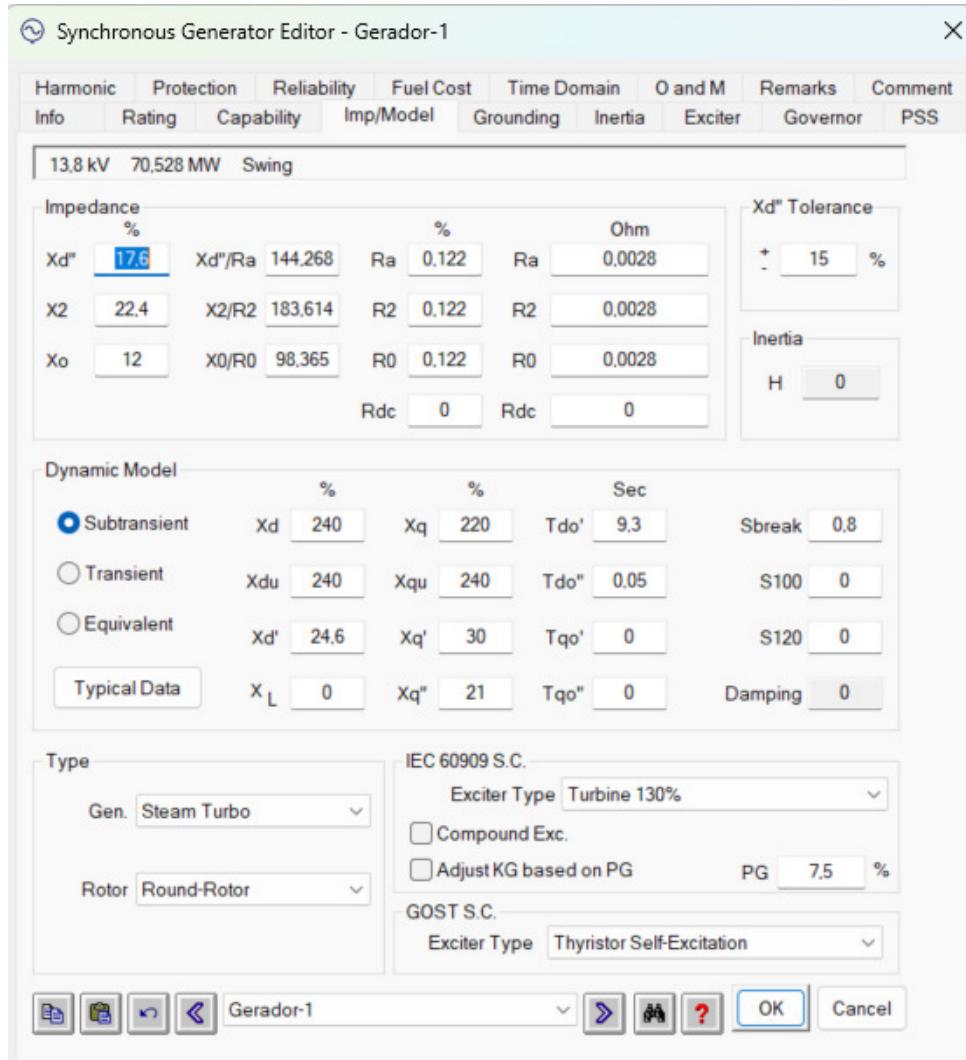


**Figura 16 – Interface da curva de capacidade do gerador.**

**Fonte:** O autor.

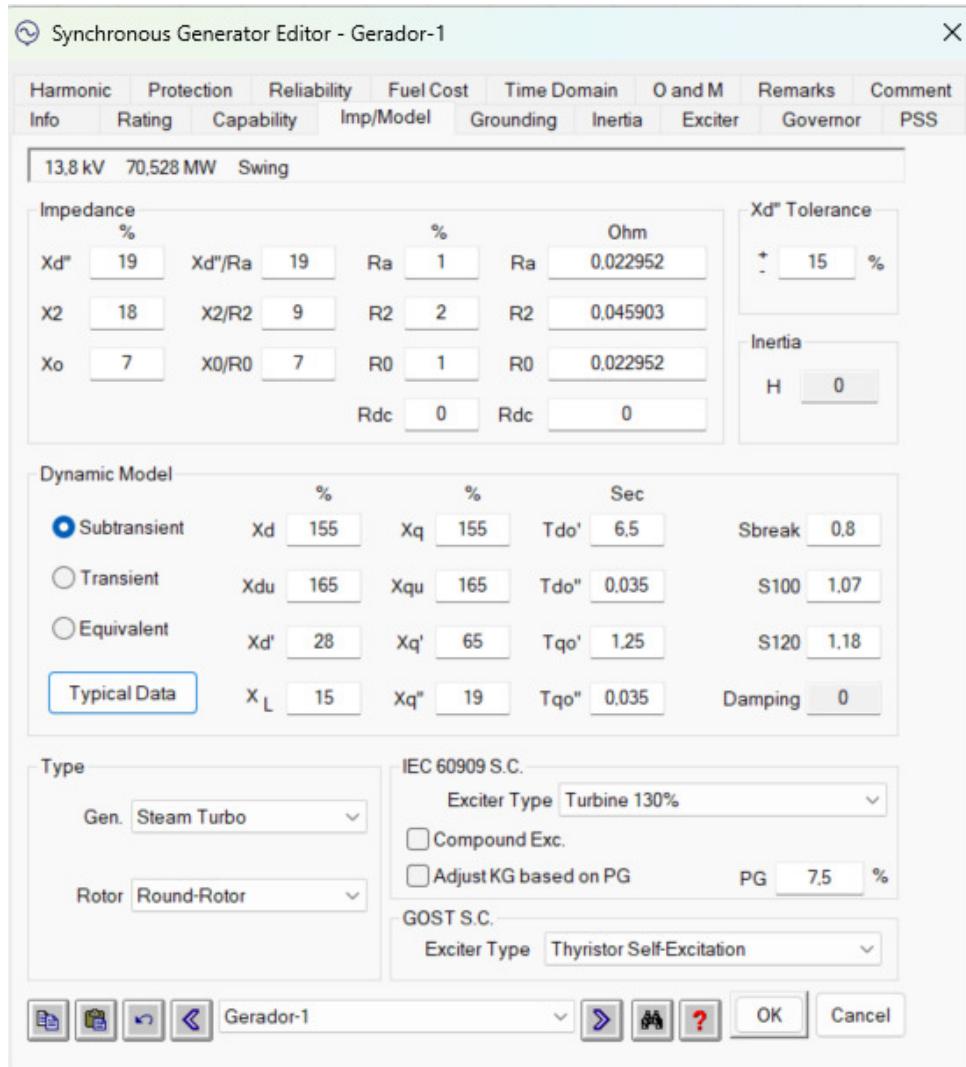
### 3.2.3.3 Página de Impedância e Modelo (Imp/Model)

A aba *Imp/Model* (Figura 17) é dividida em duas seções principais: *Impedance*, com os dados para estudos de curto-circuito, e *Dynamic Model*, para estudos de estabilidade. Uma funcionalidade notável do ETAP é o botão **Typical Data**, que preenche automaticamente os campos com valores típicos baseados em uma biblioteca interna proprietária, compilada a partir de dados de fabricantes, normas e literatura técnica. Esta ferramenta é ideal para fases preliminares de projetos, quando os dados específicos da máquina ainda não estão disponíveis, como demonstrado na Figura 18.



**Figura 17 – Interface de impedâncias e modelos do gerador.**

**Fonte:** O autor.



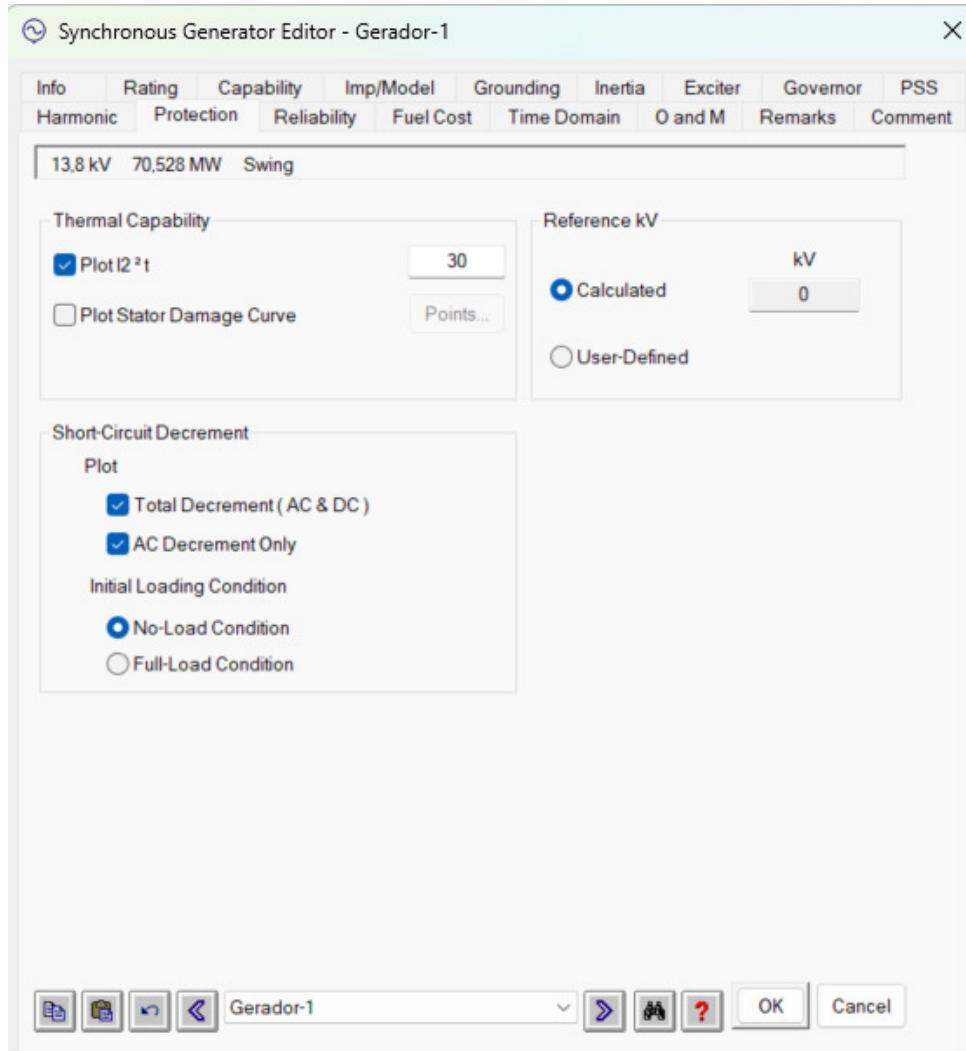
**Figura 18 – Modelo preenchido com dados típicos (Typical Data).**

**Fonte:** O autor.

### 3.2.3.4 Página de Proteção (Protection)

A aba *Protection* (Figura 19) possui duas funcionalidades centrais para a proteção do gerador. A primeira é a inserção da **curva de dano** da máquina, que define seus limites térmicos e é fundamental para a coordenação com os relés de proteção.

A segunda é a ferramenta de análise da **curva de decremento** da corrente de curto-círcuito. Ao selecionar *Plot Decrement Total*, o software exibe a forma de onda assimétrica completa (CA+CC), utilizada para determinar a corrente de pico ( $I_{\text{pico}}$ ) e dimensionar a capacidade de interrupção dos disjuntores. A opção *Plot Decrement AC Only* mostra apenas a envoltória simétrica (CA), útil para visualizar os estágios da falta ( $I_k''$ ,  $I_k'$ ,  $I_k$ ) e ajustar os relés de sobrecorrente. Para uma análise conservadora, que representa o pior caso, deve-se utilizar a opção *Full Load Condition*, que calcula a falta a partir da condição de plena carga do gerador.



**Figura 19 – Interface de configuração de proteção do gerador.**

**Fonte:** O autor.

### 3.2.4 Modelagem de Gerador no PTW

O software PTW (*Power-Tool for Windows*) possui uma vasta biblioteca de componentes, incluindo máquinas síncronas, assíncronas e **geradores**, além de modelos específicos para geração eólica e fotovoltaica. Para os propósitos deste trabalho, o foco será a modelagem detalhada do **gerador síncrono**. A Figura 20 ilustra a localização deste componente na biblioteca do software. As principais abas de configuração (*subviews*) que serão detalhadas são: *Synchronous Generator*, *IEC Contribution* e *Decrement Curve*.

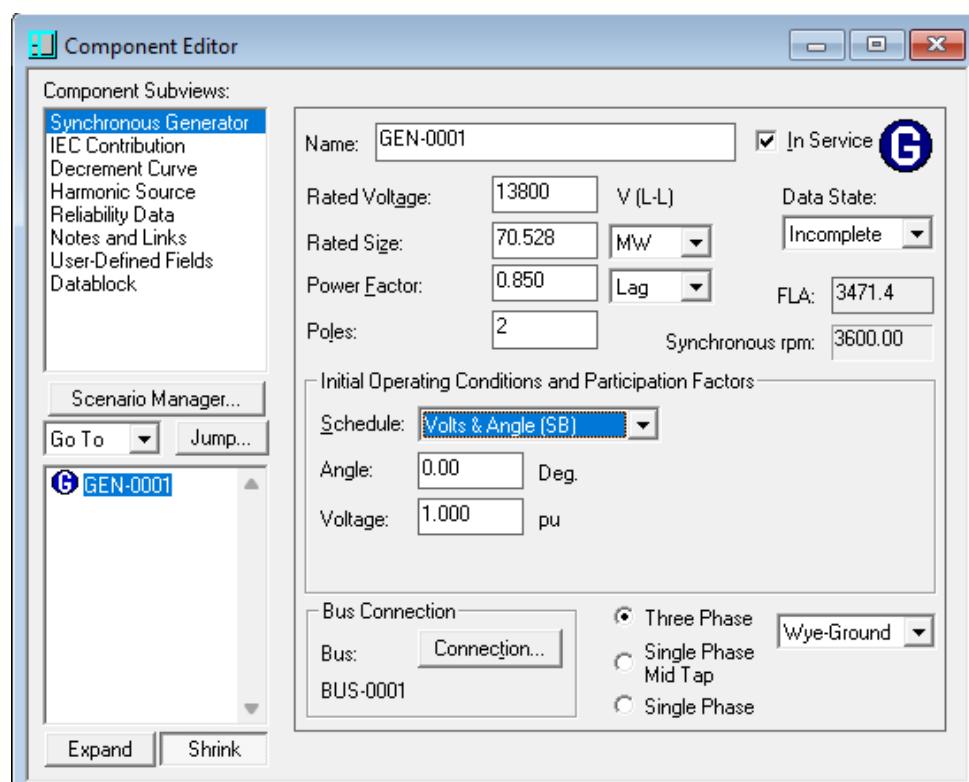


**Figura 20 – Localização do gerador síncrono na biblioteca do PTW.**

**Fonte:** O autor.

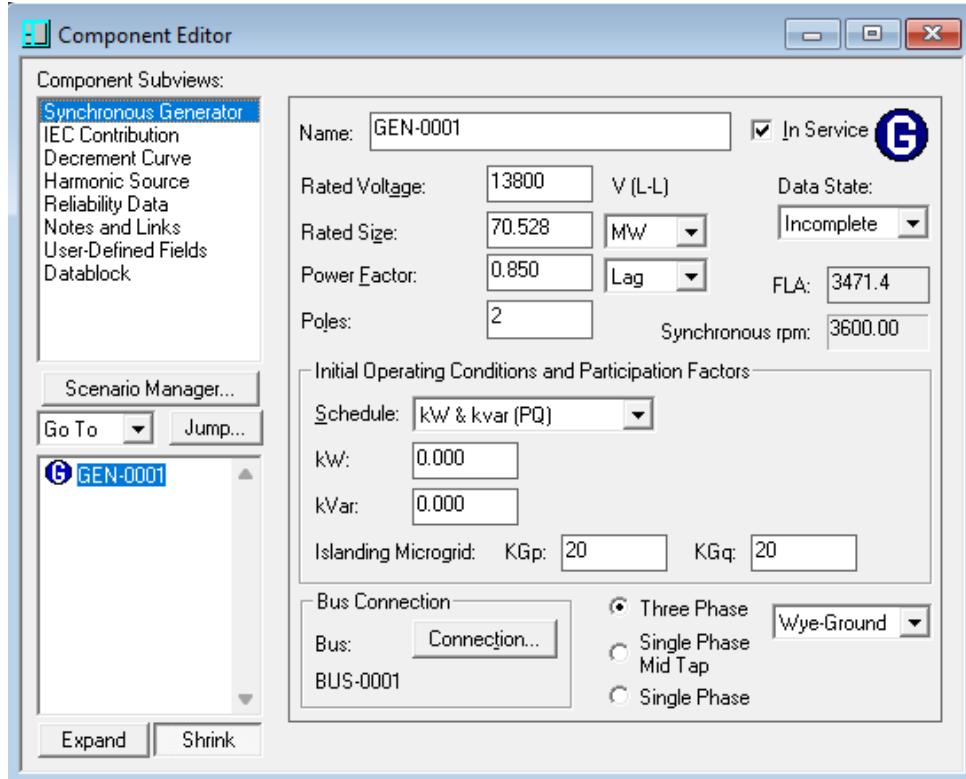
### 3.2.4.1 Dados Gerais e Modo de Operação (Subview: Synchronous Generator)

Ao inserir um gerador síncrono no PTW, a interface principal permite a definição de seus dados nominais (dados de placa) e, fundamentalmente, seu modo de operação para o estudo de fluxo de potência. O software permite configurar o gerador para operar como **Barra de Referência (Swing)**, responsável por balancear a geração e as perdas do sistema, ou como uma fonte nos modos **PV (Controle de Tensão)** ou **PQ (Potência Constante)**, conforme ilustrado na Figura 22.



**Figura 21 – Interface do gerador síncrono no PTW configurado como barra Swing.**

**Fonte:** O autor.



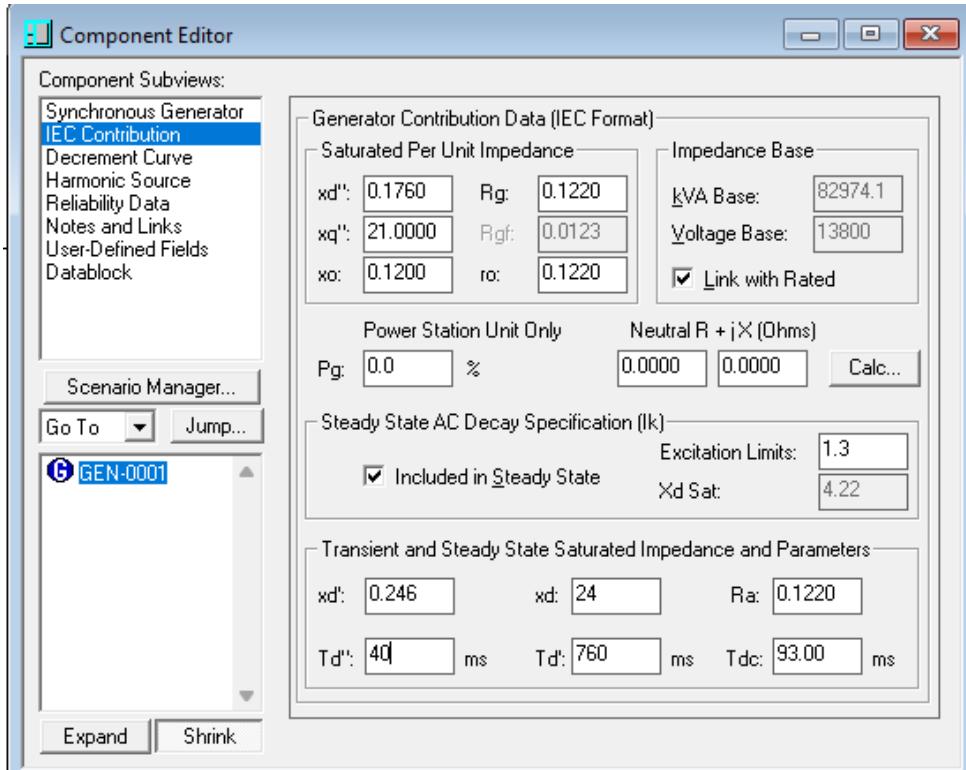
**Figura 22 – Interface do gerador síncrono no PTW configurado para operar no modo PQ.**

**Fonte:** O autor.

Para os modos de operação PV e PQ, o PTW utiliza os parâmetros  $K_{Gp}$  e  $K_{Gq}$  para modelar o **controle primário** da máquina, simulando a funcionalidade de estatismo (*droop*). Conforme a documentação do software, a metodologia para essa funcionalidade baseia-se no trabalho de Liu et al. (Liu et al. 2009). O coeficiente  $K_{Gp}$  (Regulação de Potência Ativa) representa a ação do governador de velocidade para estabilizar a **frequência**, enquanto o  $K_{Gq}$  (Regulação de Potência Reativa) representa a ação do regulador de tensão (AVR) para controlar a **tensão**. Esta funcionalidade é especialmente relevante para estudos de **sistemas ilhados e microrredes**.

### 3.2.4.2 Contribuição para Curto-Circuito (Subview: IEC Contribution)

Nesta aba (Figura 23), o usuário insere os parâmetros de impedância do gerador conforme as especificações da norma IEC 60909. Um campo notável é o **Pg (%Load)**, que representa a potência ativa pré-falta do gerador em porcentagem de sua capacidade nominal. A definição deste carregamento permite um cálculo mais preciso da tensão interna da máquina antes da falta, resultando em maior acuracidade no cálculo da corrente de curto-círcito simétrica inicial ( $I_k''$ ). A aba também contém campos para parâmetros transitórios e de regime permanente, relevantes para diferentes análises de falta.



**Figura 23 – Interface de configuração de parâmetros segundo a norma IEC 60909.**

**Fonte:** O autor.

### 3.2.4.3 Curva de Decremento e Dano (Subview: Decrement Curve)

A aba *Decrement Curve* (Figura 24) é uma ferramenta analítica com duas finalidades principais: visualizar o decaimento da corrente de curto-círcuito e definir a curva de dano térmico do gerador para fins de coordenação da proteção.

#### *3.2.4.3.1 Análise da Curva de Decremento*

O software modela a corrente de falta total assimétrica ( $I_{rms}(t)$ ) como a raiz da soma dos quadrados de suas componentes: a alternada ( $i_{ac}(t)$ ) e a contínua ( $i_{dc}(t)$ ). Conforme detalhado em normas de referência da indústria, como a **IEEE Std 242-2001 (Buff Book)** (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2001), a componente alternada decai em estágios, governada pelas constantes de tempo da máquina. A envoltória da corrente AC pode ser descrita pela seguinte equação clássica:

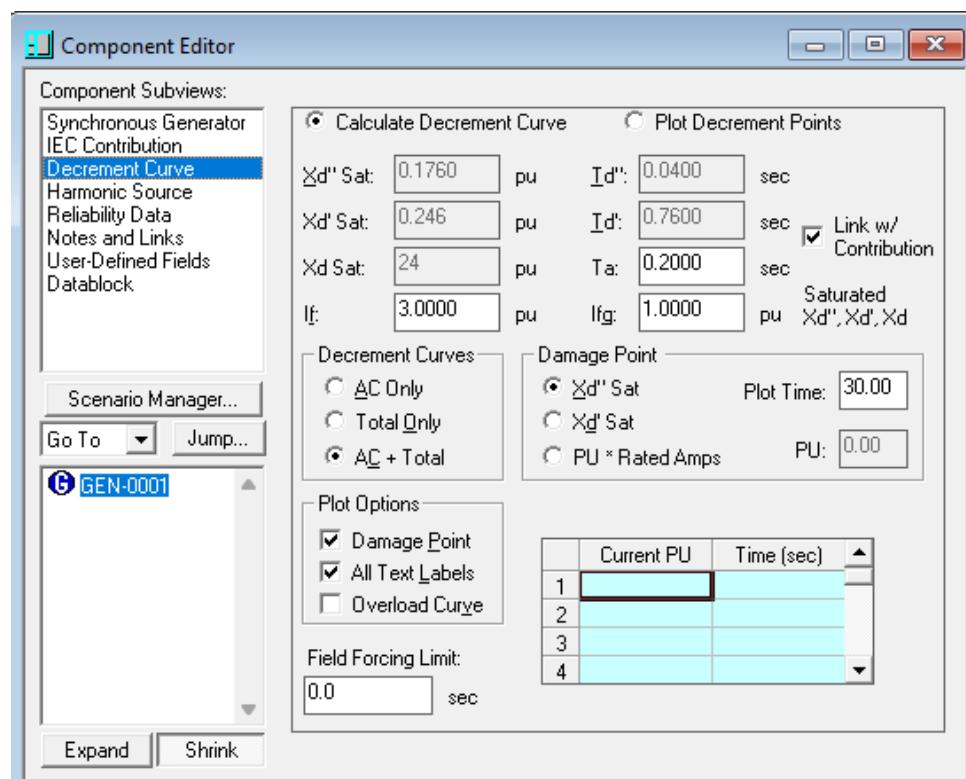
$$i_{ac}(t) = (I_d'' - I_d')e^{-t/T_d''} + (I_d' - I_d)e^{-t/T_d'} + I_d \quad (3)$$

onde  $I_d''$ ,  $I_d'$  e  $I_d$  são as correntes subtransitória, transitória e permanente, respectivamente. Paralelamente, a componente contínua, cujo valor inicial depende do instante da falta, decai

exponencialmente com a constante de tempo da armadura ( $T_a$ ). Esta análise detalhada permite a visualização precisa dos estágios subtransitório, transitório e permanente da corrente de curto-círcuito, o que é fundamental para a correta coordenação das proteções.

#### 3.2.4.3.2 Definição da Curva de Dano

Nesta mesma interface, é traçado o ponto de dano do gerador, que representa o limite de suportabilidade térmica da máquina a sobrecorrentes. A norma NEMA MG1, por exemplo, estabelece que um gerador deve suportar um curto-círcuito trifásico em seus terminais por 30 segundos. O gráfico da curva de decremento sobreposto à curva de dano é, portanto, uma ferramenta essencial para coordenar os tempos de atuação dos relés de proteção, garantindo que a falta seja eliminada antes que danos ocorram ao gerador.



**Figura 24 – Interface de análise da curva de decremento e dano do gerador no PTW.**

**Fonte:** O autor.

#### 3.2.5 Quadro Comparativo e Conclusões da Seção dos Geradores

A análise detalhada da modelagem de geradores síncronos revela filosofias e pontos fortes distintos entre as três plataformas. Embora todos os softwares sejam capazes de representar o equipamento com alta fidelidade para os estudos propostos, a abordagem, o fluxo de trabalho e as ferramentas auxiliares variam significativamente. A Tabela 2 consolida as principais características observadas.

**Tabela 2 – Quadro Comparativo da Modelagem de Geradores Síncronos nos Softwares.**  
**Fonte:** O autor.

Funcionalidade	DIGSILENT PowerFactory	ETAP	PTW (SKM)
<b>Filosofia de Modelagem</b>	Estrutura de dois níveis: <b>Tipo</b> (TypSym) para dados técnicos reutilizáveis e <b>Elemento</b> (ElmSym) para a instância operacional.	Objeto único com múltiplas páginas de configuração (Info, Rating, Imp/Model, etc.).	Objeto único com múltiplas <b>sub-vistas</b> , separando dados gerais, contribuição IEC e curva de decremento.
<b>Modo de Operação (Fluxo de Potência)</b>	Configurado no Elemento, com opções claras como <i>Reference Machine</i> e múltiplos modos no <i>Local Controller</i> .	Usa " <b>Categorias de Geração</b> " na página <i>Rating</i> para criar múltiplos perfis operacionais (Swing, PV, etc.) para a mesma máquina.	Seleção direta do modo (Swing, PV, PQ) na interface principal, com parâmetros explícitos de estatismo ( $K_{Gp}$ , $K_{Gq}$ ) para microrredes.
<b>Dados de Curto Circuito</b>	Aba dedicada no TypSym com foco em parâmetros da norma IEC 60909, como $X_{d,sat}$ e Tipo de Máquina.	Página <i>Imp/Model</i> dedicada. Inclui uma ferramenta robusta de análise da <b>curva de decremento</b> .	Aba <i>IEC Contribution</i> dedicada, com entrada explícita para o carregamento pré-falta do gerador (Pg).
<b>Dados para Proteção</b>	Curva de dano calculada implicitamente. Opções de visualização (ex: <i>ANSI Curve Shift</i> ) gerenciadas no Elemento.	Página <i>Protection</i> dedicada para a inserção da curva de dano térmico, baseada nos limites da máquina.	Aba <i>Decrement Curve</i> com dupla finalidade: análise detalhada do decaimento da corrente e plotagem do ponto de dano.
<b>Dados Típicos / Biblioteca</b>	Biblioteca de <b>Tipos</b> reutilizáveis, ideal para padronização em grandes redes.	Função " <b>Typical Data</b> " que preenche automaticamente os campos de impedância com base em um banco de dados interno.	Foco na inserção manual de dados; não destaca uma função de dados típicos para geradores.
<b>Diferencial Notável</b>	A estrutura Tipo/Elemento, de alta flexibilidade e organização para sistemas complexos.	A abrangência das ferramentas em um só lugar, especialmente a análise da curva de decremento e as "Categorias de Geração".	A clareza e transparência na separação dos dados para cada norma e estudo, e a modelagem explícita do controle primário (estatismo).

### 3.2.5.0.1 Conclusão da Análise

A análise comparativa, sintetizada na Tabela 2, evidencia que os três softwares oferecem ferramentas robustas e de alta fidelidade para a modelagem de geradores síncronos. O DIgSILENT *PowerFactory* se destaca por sua estrutura de dados orientada a objetos (Tipo/Elemento), que confere enorme flexibilidade e organização para a gestão de grandes sistemas. O ETAP, por sua vez, sobressai pela sua praticidade e pela centralização de ferramentas de análise poderosas, como o estudo da curva de decremento, em uma interface integrada. Finalmente, o PTW apresenta uma abordagem muito estruturada e transparente, com sub-vistas dedicadas para cada norma e estudo, além de um modelo explícito para controle primário, tornando-o uma ferramenta muito forte para análises de proteção e de sistemas ilhados.

## 3.3 Linhas de Transmissão

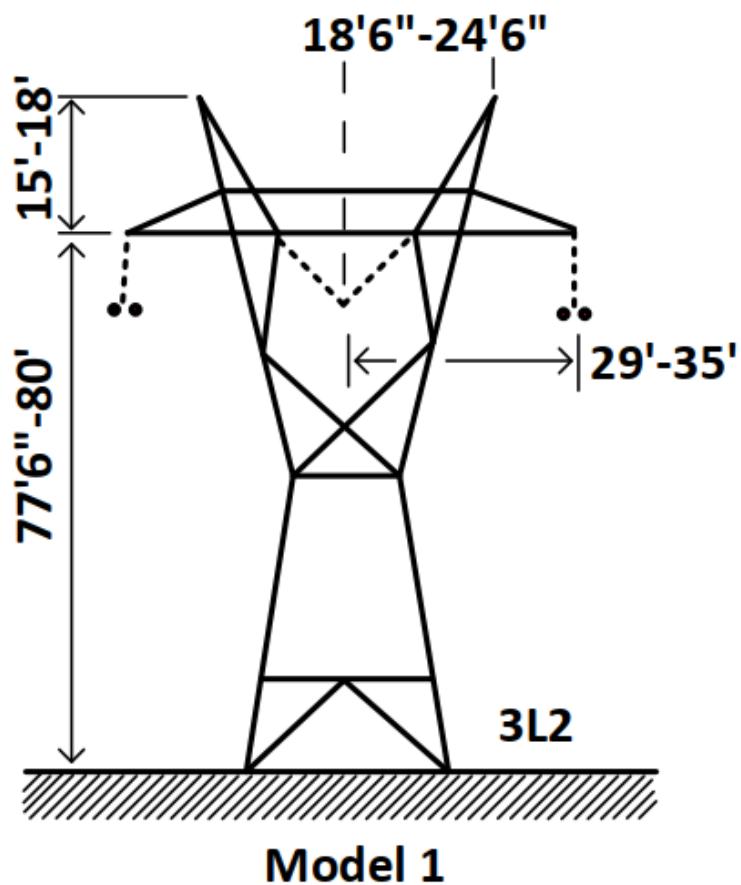
As linhas de transmissão são a infraestrutura primordial do SEP, responsáveis pelo transporte de grandes blocos de energia desde os centros de geração até as principais áreas de consumo. Conforme define Stevenson (Stevenson Jr. 1986), uma linha de transmissão consiste em um conjunto de condutores elétricos suspensos em torres, utilizando o ar como principal meio isolante. A operação em níveis de alta e extra-alta tensão é uma característica fundamental deste sistema, pois permite a redução da corrente elétrica para uma mesma potência transmitida, minimizando significativamente as perdas por aquecimento (efeito Joule) ao longo de grandes distâncias.

A importância das linhas de transmissão transcende o mero transporte de energia, sendo o elemento que confere integração, confiabilidade e otimização ao SEP. Ao interligar geograficamente as fontes de geração e os centros de consumo, elas viabilizam a exploração de recursos energéticos remotos e a integração de novas fontes renováveis à matriz (Grainger e Stevenson 1994). Essa interconexão forma uma malha robusta que permite o compartilhamento de reservas entre diferentes regiões e o despacho otimizado das usinas de menor custo, aumentando drasticamente a segurança e a eficiência econômica do sistema elétrico como um todo (Stevenson Jr. 1986).

Fica evidente, portanto, que as linhas de transmissão são ativos complexos e vitais para a operação do sistema. Por essa razão, a capacidade de modelá-las com alta fidelidade em softwares de simulação é um pilar para a engenharia de sistemas de potência. As seções a seguir se dedicarão a analisar comparativamente como as plataformas DIgSILENT *PowerFactory*, ETAP e PTW abordam essa tarefa, destacando as ferramentas que cada uma oferece para representar o comportamento de linhas e cabos de forma precisa.

### 3.3.1 Definição do Estudo de Caso para Modelagem

Para exemplificar e comparar de forma padronizada a modelagem de linhas de transmissão nos três softwares, foi definido um estudo de caso prático. A geometria da torre utilizada é baseada em um modelo apresentado na Brochura Técnica 736 do CIGRÉ (CIGRÉ Working Group C4.502 2018), conforme ilustrado no esquema da Figura 25.



**Figura 25 – Esquema da torre de transmissão utilizada como base para o estudo de caso.**

**Fonte:** Fonte: Adaptado de (CIGRÉ Working Group C4.502 2018)..

Para conferir maior realismo e utilizar dados de um fabricante de referência no mercado, os cabos condutores de fase do modelo original foram substituídos por um cabo tipo ACSR do catálogo técnico da Alubar Altec (Alubar Altec 2022). A Tabela 3 consolida todos os parâmetros geométricos e elétricos resultantes desta combinação, que servirão como dados de entrada para as simulações nas três plataformas de software.

**Tabela 3 – Parâmetros Consolidados da Linha de Transmissão para o Estudo de Caso.**

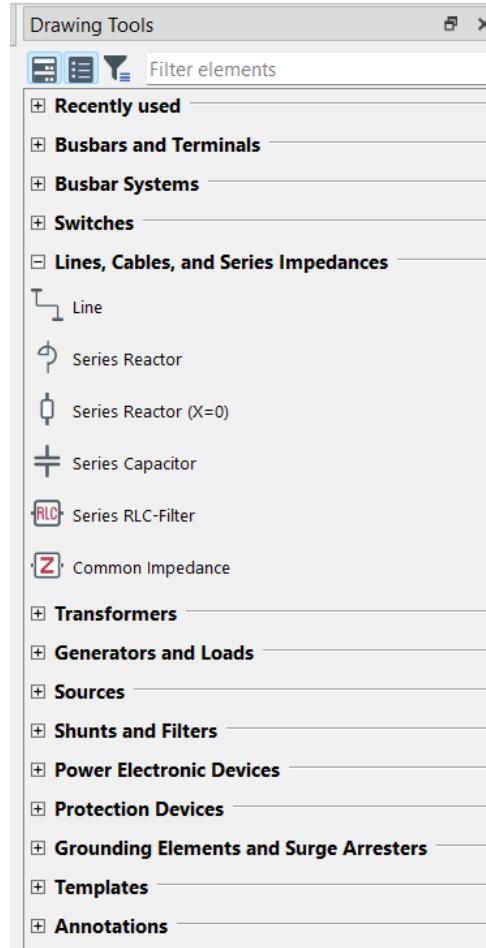
Cabo	Fase	Resistência DC [Ω/km]	Diâmetro Externo [cm]	Distância Horizontal [m]	Altura na Torre [m]	Altura no Meio do Vão [m]
Nº						
1 (Guarda)	0	0.1360	0.980	-6.55	28.80	28.80
2 (Guarda)	0	0.1360	0.980	6.55	28.80	28.80
3 (Fase A)	1	0.0597	2.961	-9.75	23.77	23.77
4 (Fase B)	2	0.0597	2.961	0.00	23.77	23.77
5 (Fase C)	3	0.0597	2.961	9.75	23.77	23.77

Fonte: O autor, com dados de (CIGRÉ Working Group C4.502 2018) e (Alubar Altec 2022).

É importante notar que os dados geométricos originais do documento do CIGRÉ foram fornecidos em pés e polegadas, sendo convertidos para o Sistema Internacional de Unidades (metros). Os dados elétricos, como a resistência DC e o diâmetro, foram obtidos diretamente do catálogo do fabricante para o condutor especificado.

### 3.3.2 Modelagem da Linha de Transmissão no DIgSILENT PowerFactory

No DIgSILENT PowerFactory, a modelagem de uma linha de transmissão é realizada através do componente Line (ElmLne). De forma análoga aos geradores, a sua parametrização segue uma filosofia de dois níveis que separa o objeto físico de seus dados técnicos: o **Elemento** (ElmLne), que é inserido no diagrama unifilar, e o **Tipo** (TypLne), que armazena os dados de engenharia. A localização do elemento é mostrada na Figura 26.



**Figura 26 – Localização do elemento de linha (Line) na biblioteca do PowerFactory.**

**Fonte:** O autor.

### 3.3.2.1 A Modelagem Modular de Linhas de Transmissão

A grande força da modelagem de linhas no PowerFactory reside em sua abordagem modular, que permite desde uma inserção simples de dados até um cálculo detalhado com base na geometria física. Diferente de uma simples cadeia hierárquica, a abordagem detalhada envolve a criação de tipos independentes na biblioteca, que são então associados no diagrama unifilar.

#### *3.3.2.1.1 Abordagem Detalhada (Baseada na Geometria)*

O processo de modelagem detalhada é dividido em duas etapas principais:

##### **3.3.2.1.1.1 Etapa 1: Definição dos Tipos na Biblioteca**

Primeiramente, dois tipos de "moldes" são criados de forma independente na biblioteca de equipamentos:

- **Modelo Geométrico da Estrutura (TypGeo e TypTow):** A modelagem física inicia-se com o TypGeo, que define exclusivamente as coordenadas (x,y) dos condutores na torre. Em seguida, o TypTow (Tipo de Torre) utiliza essa geometria e a associa aos tipos de condutores (TypCon), criando um modelo físico completo da estrutura e dos cabos que ela suporta.
- **Modelo Elétrico do Condutor (TypLne):** De forma independente, o TypLne (Tipo de Linha) é criado para definir as **características elétricas do cabo condutor** por unidade de comprimento (resistência, indutância, etc.). É este o tipo que contém os parâmetros elétricos fundamentais que serão usados nos cálculos de fluxo de potência e curto-circuito.

### 3.3.2.1.1.2 Etapa 2: Associação no Diagrama Unifilar

Após a definição dos tipos, a associação final que une o modelo elétrico ao físico ocorre no diagrama. Primeiro, o elemento de linha (ElmLne) é desenhado e a ele se associa o TypLne correspondente, definindo suas propriedades elétricas. Em seguida, para estudos que exigem a consideração da geometria (como o de acoplamento mútuo), um elemento de **Acolplamento de Torre (ElmTow)** é utilizado. É dentro deste elemento ElmTow que se seleciona o modelo geométrico (TypTow) e se especifica quais elementos de linha (ElmLne) estão fisicamente dispostos naquela estrutura.

#### 3.3.2.1.2 Abordagem Prática (Entrada Direta de Dados)

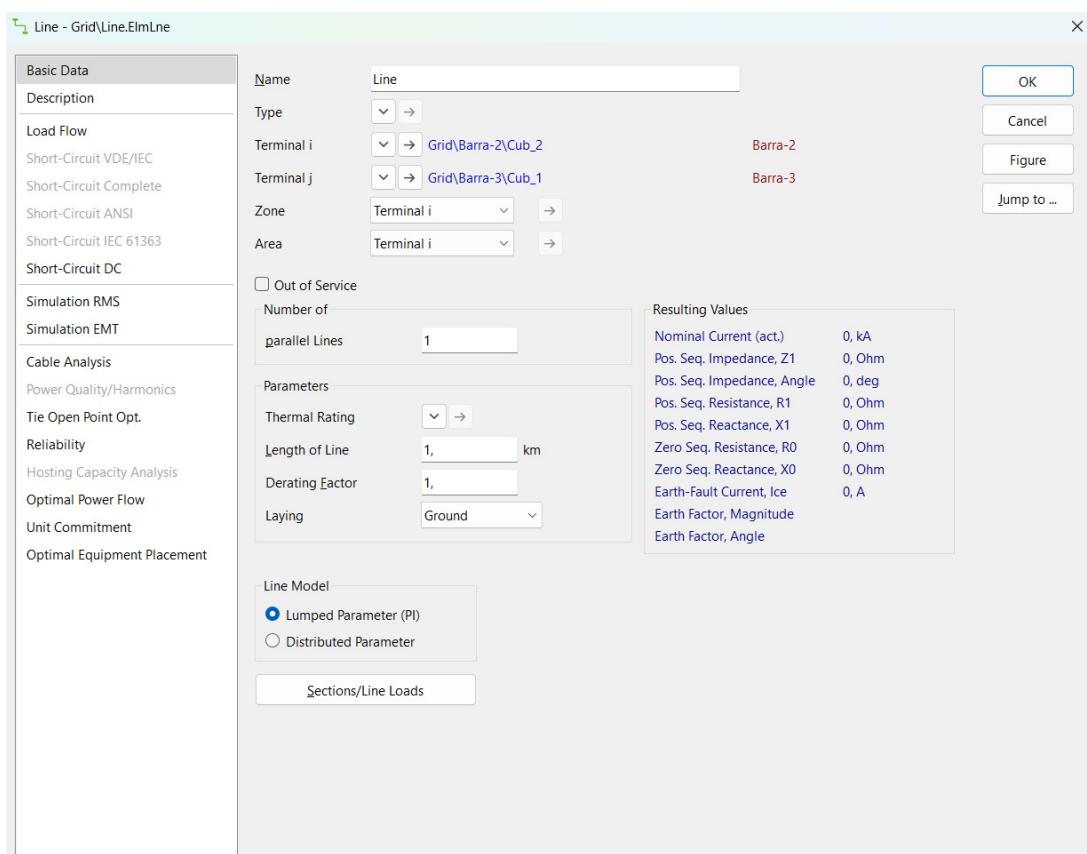
Alternativamente, o TypLne permite a inserção manual e direta dos parâmetros de sequência da linha ( $R_1, X_1, C_1, R_0, X_0, C_0$ ). Esta abordagem é ideal quando os dados já são conhecidos a partir de *datasheets* de fabricantes ou de outros cálculos, tornando o processo de modelagem mais rápido.

#### 3.3.2.1.3 Tipo para Cabos Subterrâneos (TypCabsys)

Para **cabos subterrâneos ou submarinos**, o software oferece um tipo exclusivo, o TypCabsys. Este modelo é mais complexo, pois considera as camadas construtivas do cabo (isolação, blindagem), seu arranjo físico na instalação (valas, dutos) e as propriedades térmicas do solo para calcular tanto os parâmetros elétricos quanto a capacidade de corrente (ampacidade).

### 3.3.2.2 Configuração do Elemento de Linha (ElmLine)

Uma vez que o Tipo (TypLine ou TypCabsys) está criado e configurado, a parametrização do Elemento ElmLine no diagrama é focada em seus dados de instância. A aba principal, *Basic Data* (Figura 27), é onde se associa o elemento a um Tipo já existente e se define o comprimento da linha em quilômetros. Um aspecto fundamental nesta aba é a seleção do **modelo de representação da linha**, onde o usuário pode optar entre o modelo de **parâmetros concentrados (PI)** ou o modelo de **parâmetros distribuídos**, que oferece maior precisão para linhas longas. Com base no Tipo associado, no comprimento e no modelo de cálculo escolhido, o software exibe os parâmetros totais da linha na área *Resulting Values*. Esses valores resultantes refletirão os dados calculados a partir da geometria (se a abordagem detalhada foi usada na criação do Tipo) ou os dados inseridos manualmente pelo usuário.



**Figura 27 – Interface *Basic Data* do elemento linha (ElmLine).**

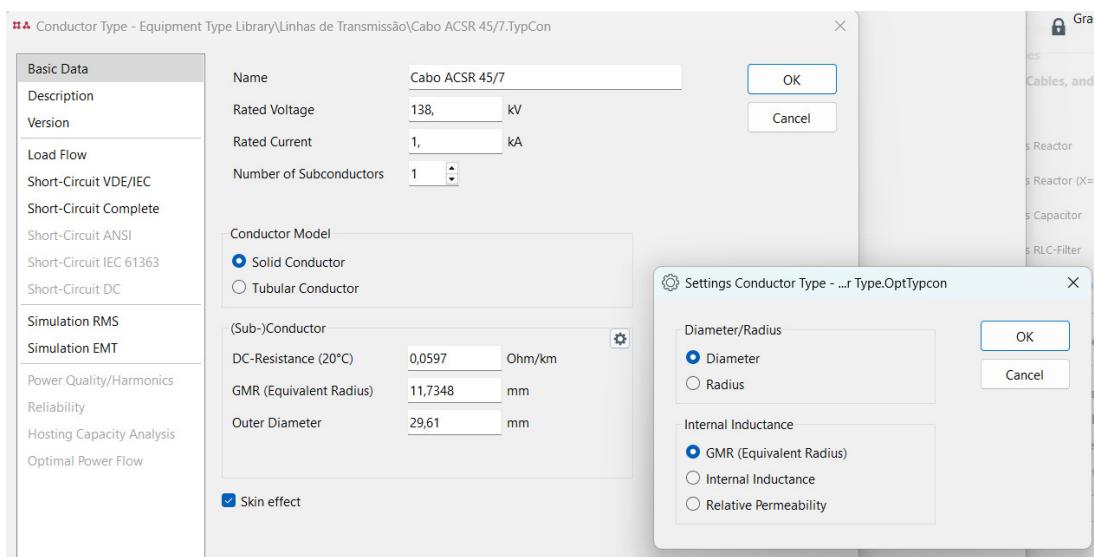
**Fonte:** O autor.

A seguir, será detalhada a configuração dos "Tipos" necessários para a modelagem da linha de transmissão do estudo de caso. A abordagem seguirá uma lógica construtiva, iniciando pelo componente mais fundamental (o condutor), progredindo para a estrutura da torre e finalizando no tipo de linha agregado.

### 3.3.2.3 Definição do Tipo de Condutor (TypCon)

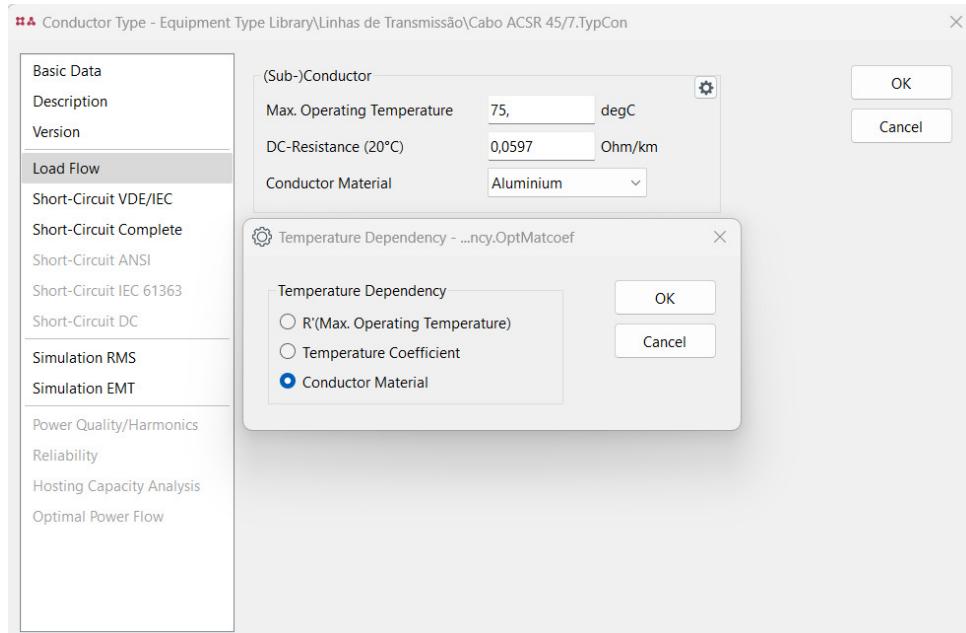
O primeiro passo é cadastrar na biblioteca do software os tipos de cabos que serão utilizados. O TypCon é o objeto que armazena todas as características elétricas e físicas de um condutor específico.

Na aba *Basic Data* (Figura 28), o usuário insere os dados nominais, como resistência DC e parâmetros geométricos. Uma funcionalidade interessante é a flexibilidade de entrada de dados no campo *(Sub-)Conductor*; ao alternar entre diferentes parâmetros (ex: GMR ou diâmetro), o software recalcula os campos relacionados, evitando a necessidade de inserção duplicada. Para este trabalho, o dado do GMR foi obtido a partir da referência (Southwire Company 2007). A aba *Load Flow* (Figura 29) permite a inserção de limites térmicos do condutor.



**Figura 28 – Interface da aba *Basic Data* para a configuração do Tipo de Condutor (TypCon).**

**Fonte:** O autor.

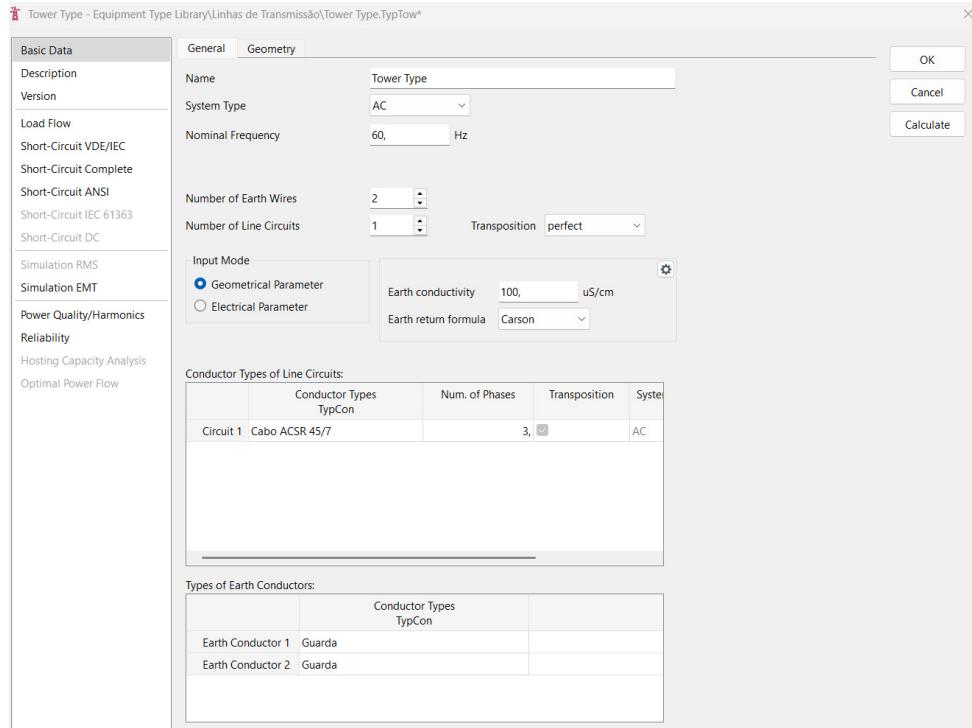


**Figura 29 – Interface da aba *Load Flow* para a configuração do Tipo de Condutor (TypCon).**  
Fonte: O autor.

### 3.3.2.4 Definição do Tipo de Torre (TypTow)

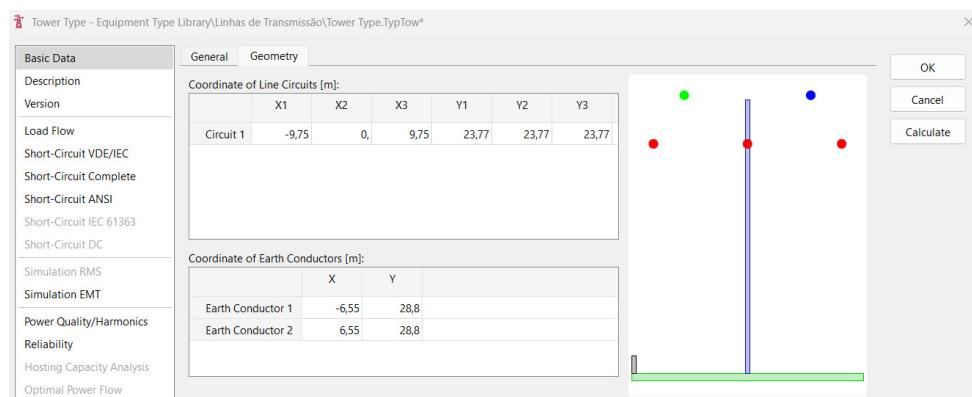
O TypTow é o objeto que representa a estrutura física da torre de transmissão. Sua função é combinar os condutores (definidos como TypCon) com uma geometria específica para que o software possa calcular as matrizes de impedância e admitância da linha.

Na aba *Basic Data* (Figura 30), o usuário define características gerais, como o tipo de sistema (CA ou CC) e seleciona, a partir da biblioteca, os TypCon que representarão os condutores de fase (*Conductor Types*) e os cabos de guarda (*Earth Conductors*). Na seção *Geometry* (Figura 31), são inseridas as coordenadas espaciais de cada um desses cabos na estrutura da torre.



**Figura 30 – Interface inicial do Tipo de Torre (TypTow).**

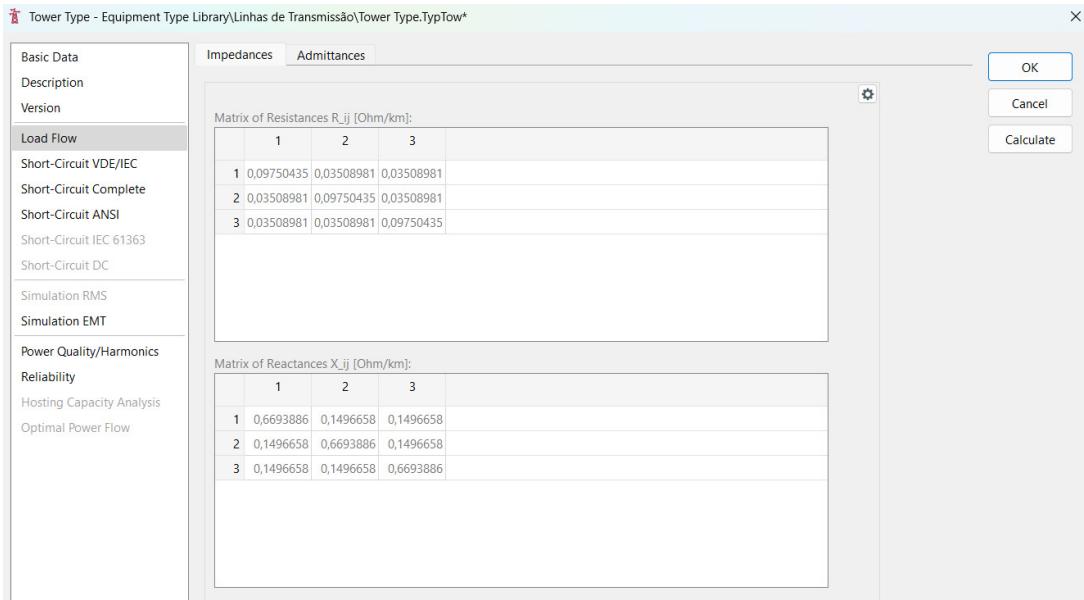
**Fonte:** O autor.



**Figura 31 – Interface para a configuração da geometria dos cabos no TypTow.**

**Fonte:** O autor.

Após a inserção dos dados, ao acionar o comando *Calculate*, o PowerFactory computa os parâmetros elétricos da linha por unidade de comprimento. Os resultados, como as matrizes de impedância e admitância de sequência, podem ser visualizados em abas como a de *Load Flow* (Figura 32).



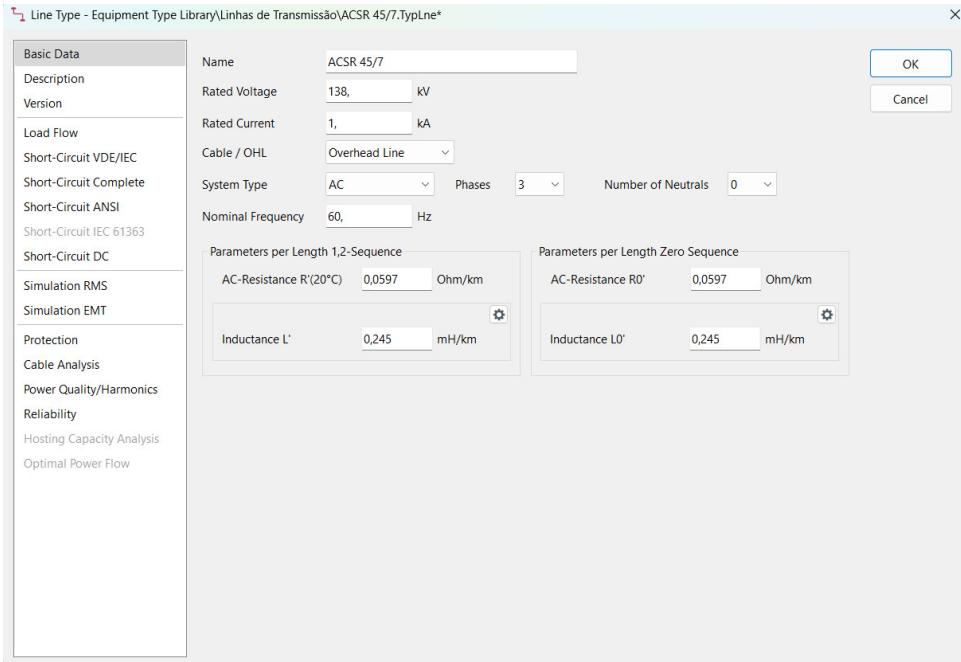
**Figura 32 – Visualização das matrizes de impedância e admitância calculadas no TypTow.**

Fonte: O autor.

### 3.3.2.5 Definição do Tipo de Linha (TypLne)

A modelagem de uma linha de transmissão no DIgSILENT PowerFactory inicia-se com a criação do seu **Tipo de Linha (TypLne)**. Este objeto funciona como o molde que define as **características elétricas fundamentais do cabo condutor**, como sua resistência, reatância e susceptância por unidade de comprimento. Para este estudo de caso, a abordagem utilizada consistiu na entrada direta destes parâmetros no TypLne. É importante notar que esta é uma das duas metodologias de modelagem; a outra, mais detalhada, envolve a representação da geometria física da torre através de um **Tipo de Torre (TypTow)** e de um elemento de acoplamento (**ElmTow**), sendo essencial para estudos específicos como o de acoplamento mútuo.

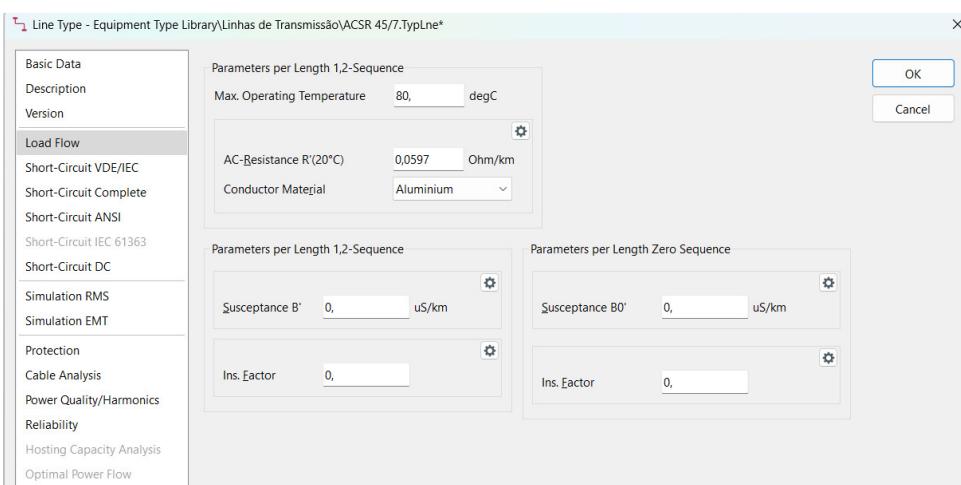
Na aba *Basic Data* (Figura 33), são inseridos os dados elétricos por unidade de comprimento da linha, como resistência, reatância indutiva e susceptância capacitiva. Para este trabalho, os dados de reatância foram obtidos da referência (Southwire Company 2007), uma vez que não constavam no catálogo do fabricante (Alubar Altec 2022).



**Figura 33 – Interface *Basic Data* do TypLine para entrada manual de dados.**

**Fonte:** O autor.

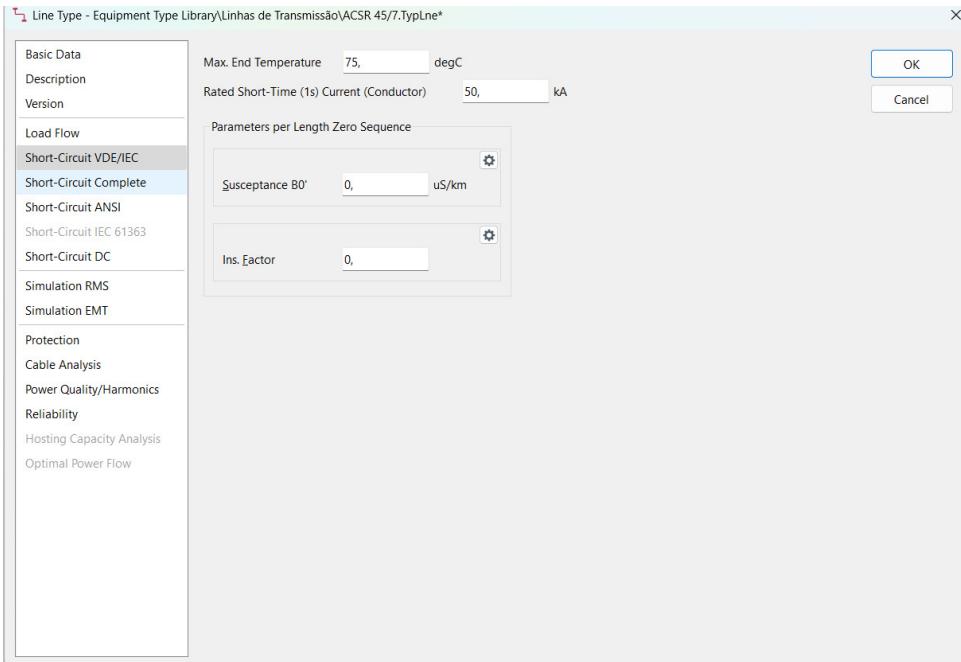
Na aba *Load Flow* (Figura 34), um parâmetro relevante é o *Ins. Factor* (Fator de Isolação), que modela a condutância em derivação ( $G'$ ). Para sistemas de transmissão operando em tensões até 345 kV, as perdas por fuga nos isoladores e efeito corona são comumente consideradas desprezíveis (Stevenson Jr. 1986). Assim, em conformidade com a prática padrão, este fator foi definido como zero.



**Figura 34 – Interface de *Load Flow* no TypLine.**

**Fonte:** O autor.

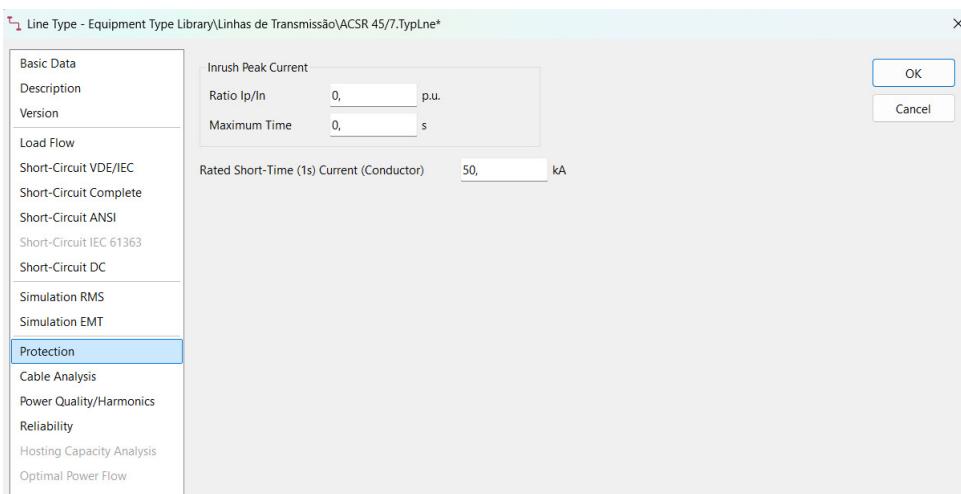
A aba *Short-Circuit VDE/IEC* (Figura 35) requer parâmetros específicos para estudos de falta, como a corrente nominal de curta duração (*Rated Short-Time (1s) Current*), cujo valor foi obtido em (Southwire Company 2007).



**Figura 35 – Interface de Short-Circuit no TypLine.**

**Fonte:** O autor.

Finalmente, na aba *Protection* (Figura 36), o parâmetro *Inrush Peak Current* é notável. Embora linhas sejam elementos passivos, este campo permite definir uma restrição para o relé que protege a linha, garantindo que ele não atue indevidamente durante a energização de cargas com alta corrente de partida, como transformadores, assegurando assim a seletividade da proteção.



**Figura 36 – Interface de Proteção no TypLine.**

**Fonte:** O autor.

### 3.3.3 Modelagem da Linha de Transmissão no ETAP

O software ETAP dispõe de uma biblioteca com elementos distintos para a modelagem de circuitos. Diferentemente de uma abordagem com um componente genérico, a ferramenta

oferece ícones específicos para cada tipo de infraestrutura, conforme ilustra a Figura 37. Os principais elementos disponíveis são a **Linha de Transmissão (Transmission Line)**, para linhas aéreas, o **Cabo (Cable)**, para sistemas subterrâneos ou industriais, e a **Impedância (Impedance)**, como forma genérica de representação. Para este trabalho, será detalhada a modelagem utilizando o elemento *Transmission Line*.

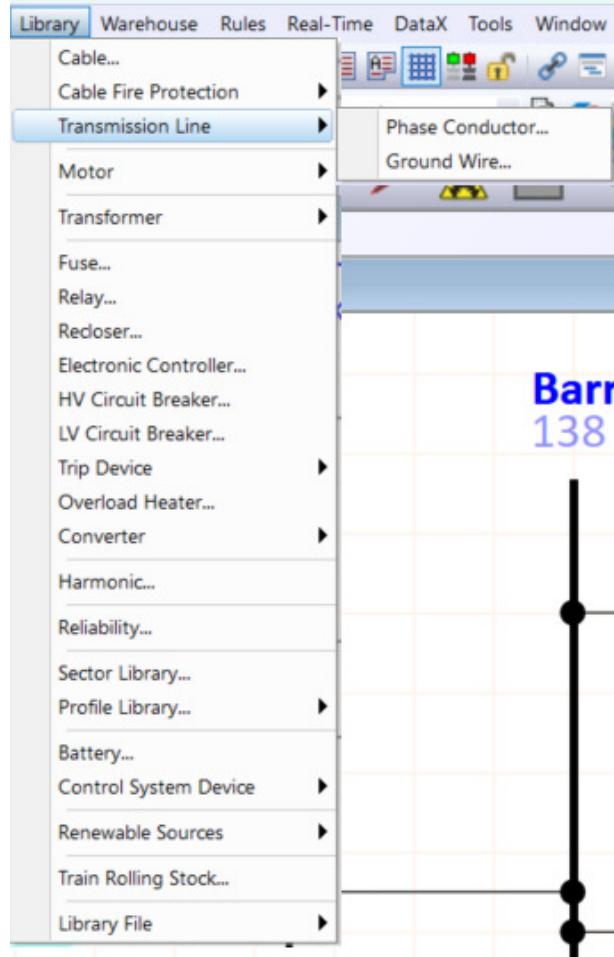


**Figura 37 – Localização dos elementos de Linha, Cabo e Impedância no ETAP.**

**Fonte:** O autor.

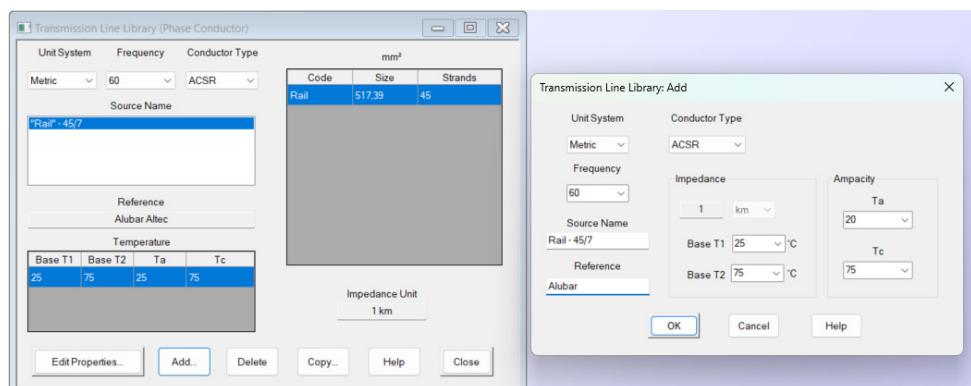
### 3.3.3.1 Etapa 1: Definição do Condutor na Biblioteca

Antes de configurar a linha de transmissão, é fundamental cadastrar os dados do cabo condutor na biblioteca do ETAP, garantindo a precisão e a reutilização do modelo. O acesso à biblioteca de condutores de linhas aéreas (*Library*) é demonstrado na Figura 38.

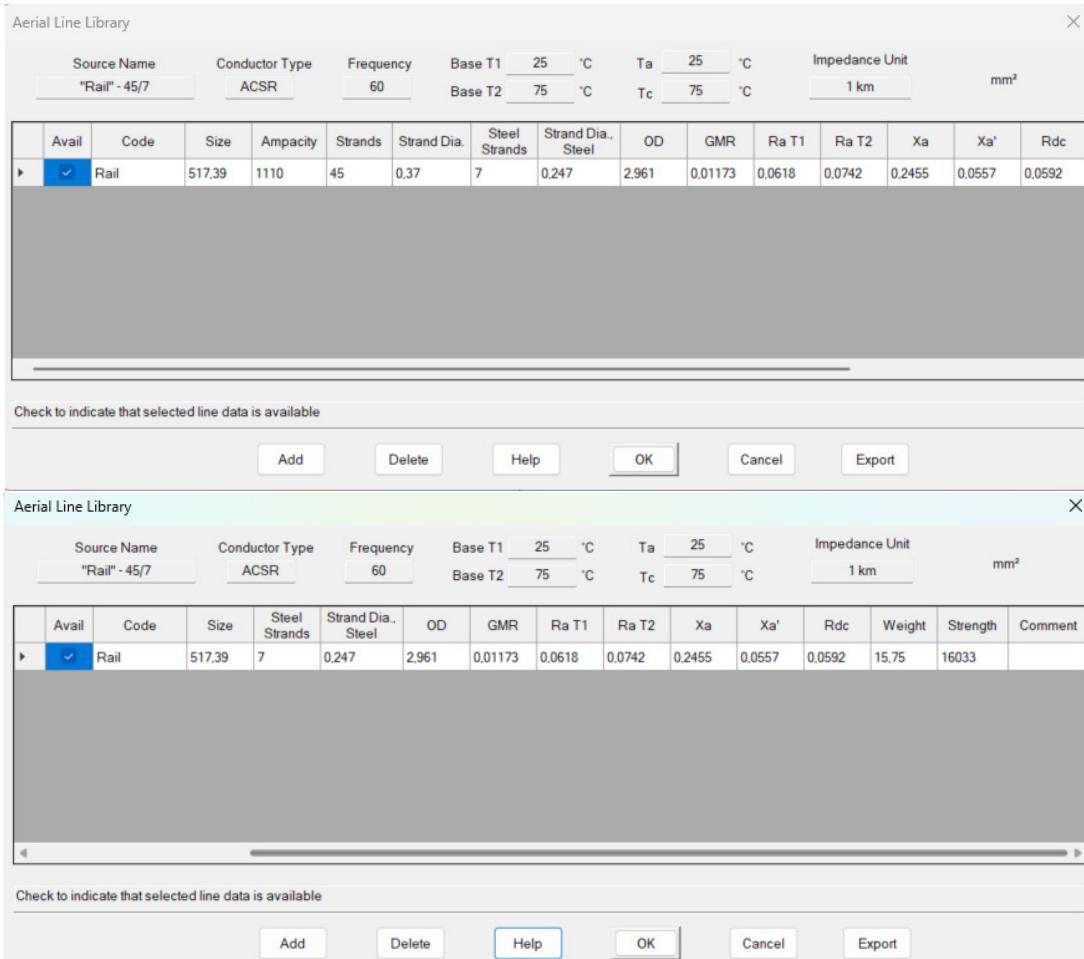


**Figura 38 – Acesso à biblioteca de condutores para linhas aéreas no ETAP.**  
Fonte: O autor.

O processo de criação de um novo condutor inicia com a definição de suas características básicas (Figura 39) e prossegue para a janela principal de parâmetros (Figura 40), onde são inseridos todos os dados elétricos e mecânicos. Para este trabalho, os valores foram obtidos dos catálogos (Alubar Altec 2022) e (Southwire Company 2007). É importante ressaltar que a metodologia para a modelagem do cabo para-raios segue o mesmo procedimento.



**Figura 39 – Etapa 1: Definição das características iniciais do condutor.**  
Fonte: O autor.



**Figura 40 – Etapa 2: Janela de inserção de dados físicos e elétricos do condutor.**

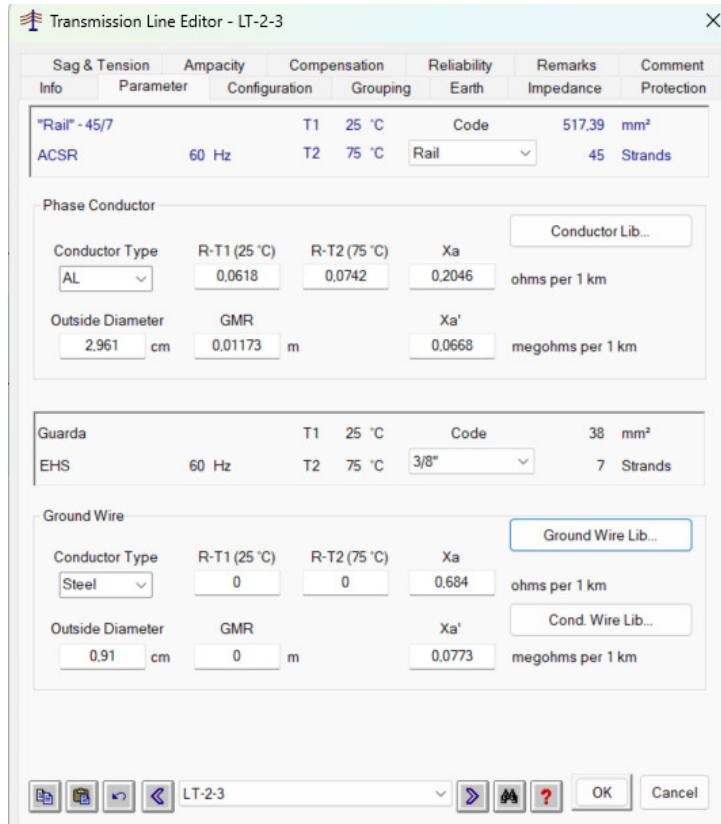
**Fonte:** O autor.

### 3.3.3.2 Etapa 2: Configuração do Elemento de Linha de Transmissão

Com os condutores já cadastrados na biblioteca, a configuração do elemento *Transmission Line* é realizada através de suas páginas de parâmetros.

#### *3.3.3.2.1 Páginas Parameter e Configuration*

Na página *Parameter* (Figura 41), o usuário seleciona os condutores de fase e de guarda a partir da biblioteca. Em seguida, na página *Configuration* (Figura 42), define-se a geometria da torre, especificando as coordenadas espaciais de cada condutor. O software dispõe de configurações pré-definidas para diversas torres padrão.



**Figura 41 – Página *Parameter* para seleção dos condutores da biblioteca.**

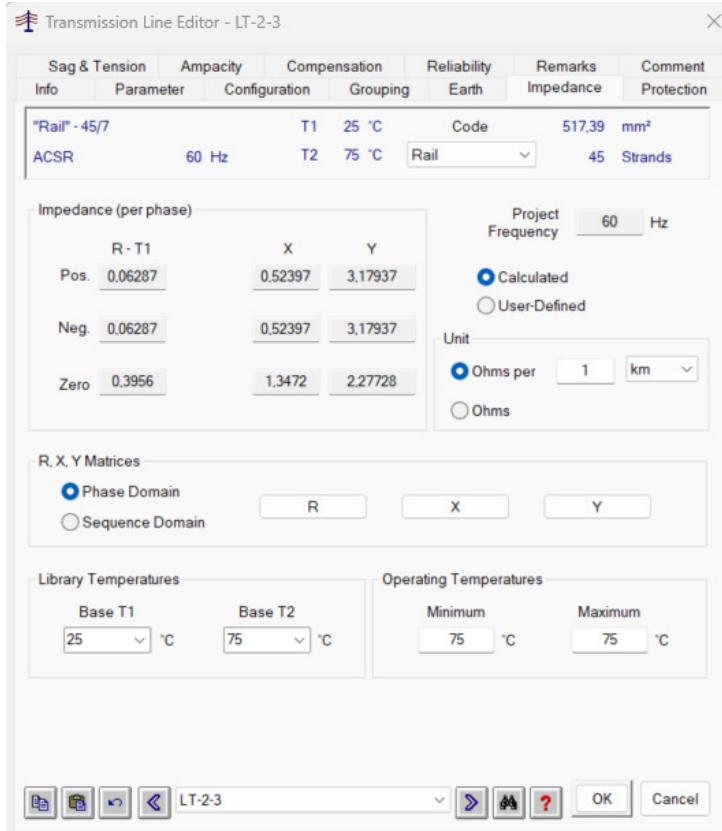
**Fonte:** O autor.



**Figura 42 – Página Configuration para definição da geometria da torre.**  
**Fonte:** O autor.

### 3.3.3.2.2 Página Impedance

Esta página (Figura 43) é onde o software exibe os resultados. O ETAP oferece dois modos principais para a definição da impedância da linha: o modo **Calculado (Calculated)**, que utiliza os dados geométricos e dos cabos para computar as matrizes de impedância e admitância com alta precisão; e o modo **Definido pelo Usuário (User-Defined)**, que permite a inserção manual de valores de impedância já conhecidos, ideal para estudos preliminares. Para trabalhos acadêmicos e projetos detalhados, o modo calculado é o preferencial. A Figura 44 exibe um exemplo da matriz de reatâncias calculada.



**Figura 43 – Interface da página *Impedance* com os resultados calculados.**

**Fonte:** O autor.

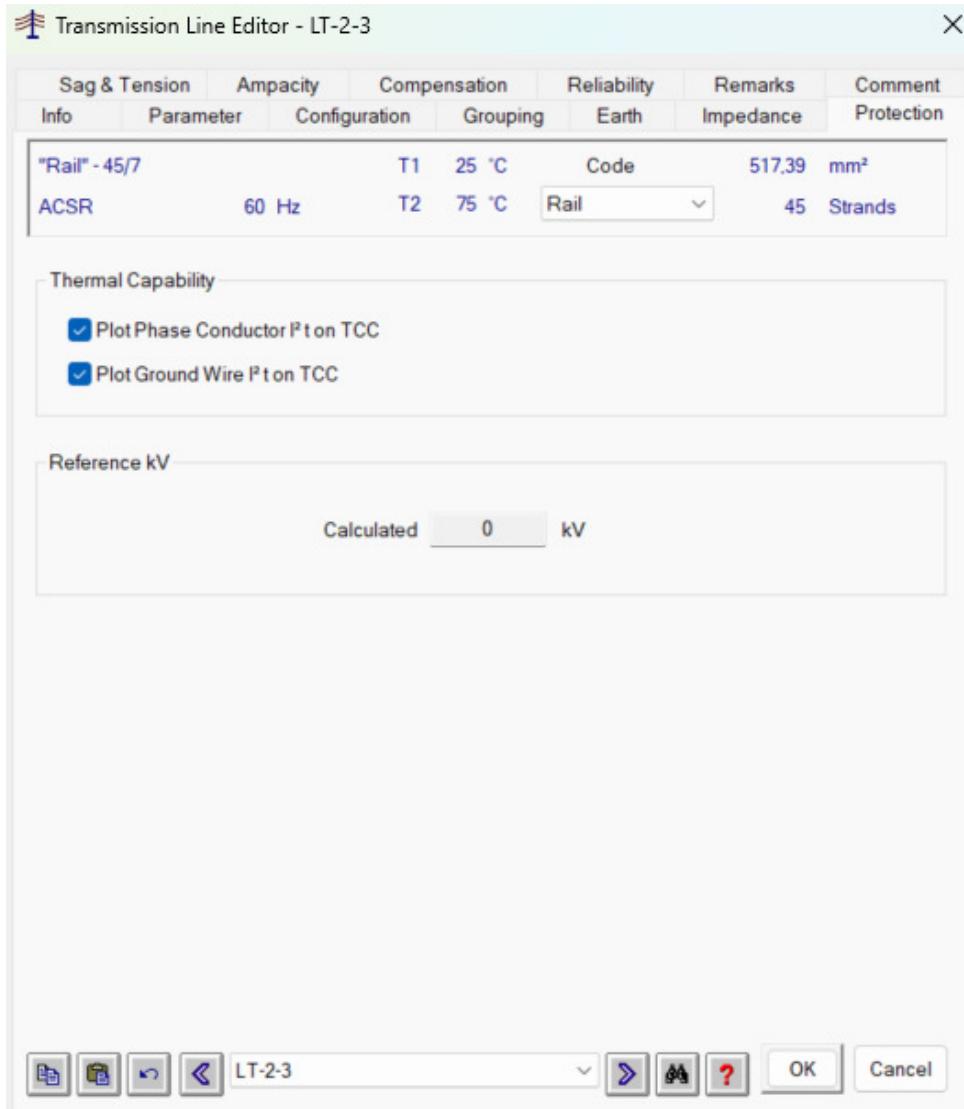
Reactance Matrix (ohms)			
LT-2-3			
A	B	C	
A 0.798	0.274	0.274	
B 0.274	0.798	0.274	
C 0.274	0.274	0.798	

**Figura 44 – Exemplo de matriz de reatância calculada pelo software.**

**Fonte:** O autor.

### 3.3.3.2.3 Página Protection

A aba *Protection* (Figura 45) é a interface que conecta o modelo físico da linha de transmissão com o sistema de proteção. Sua função principal é permitir a representação da **curva de dano térmico** do condutor, que representa o limite de sobrecorrente que o cabo pode suportar em função do tempo.



**Figura 45 – Interface da página *Protection* para a linha de transmissão.**

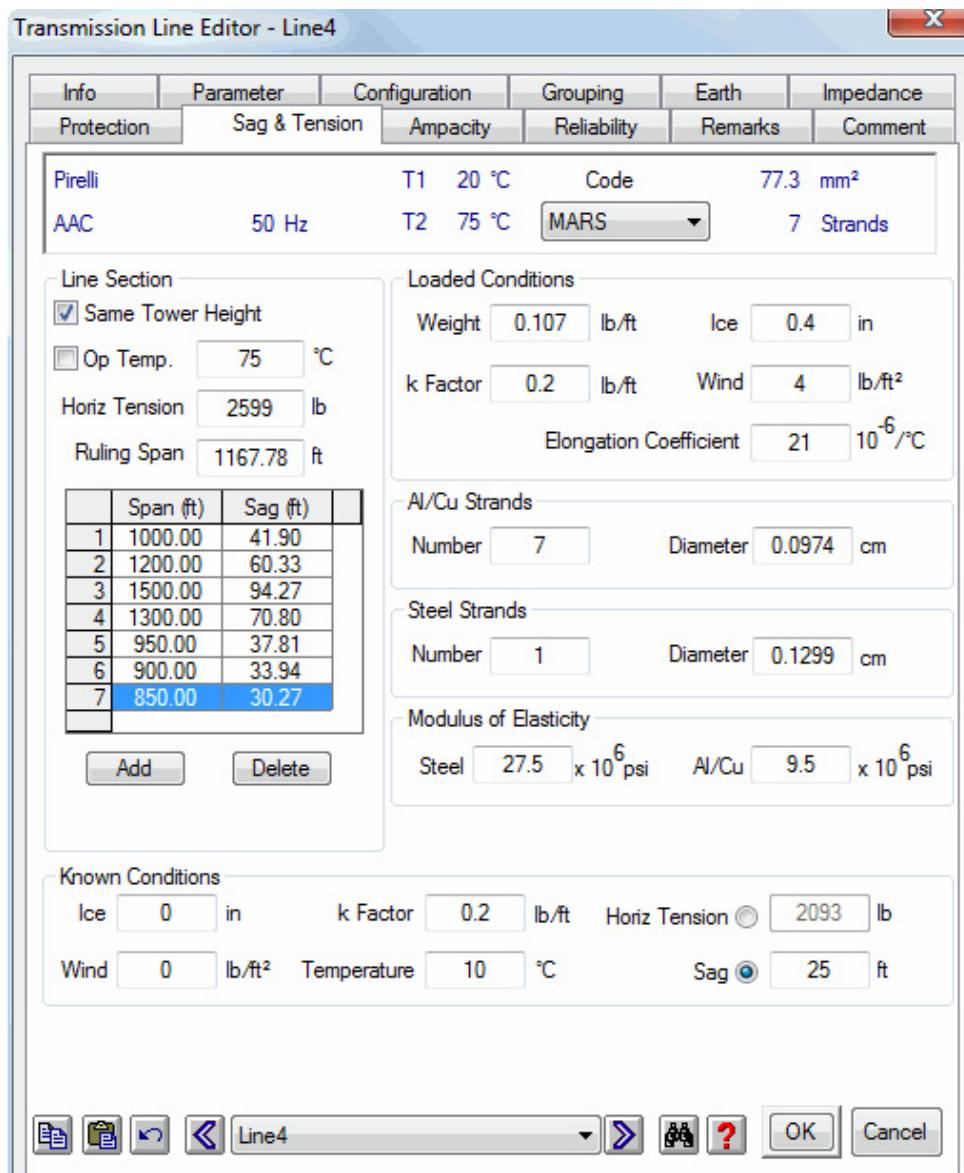
**Fonte:** O autor.

### 3.3.3.3 Ferramentas de Análise Adicionais

Além da modelagem elétrica principal, o ETAP oferece um conjunto de ferramentas de análise de engenharia para linhas de transmissão.

#### *3.3.3.3.1 Flecha e Tração (Sag and Tension)*

Esta ferramenta (Figura 46) realiza a análise mecânica do comportamento dos cabos sob diferentes condições climáticas (temperatura, vento, gelo). Utilizando o Método do Vão de Referência (*Ruling Span Method*), o software calcula a flecha e a tração nos condutores, garantindo um dimensionamento seguro contra rompimentos ou violação das distâncias de segurança.

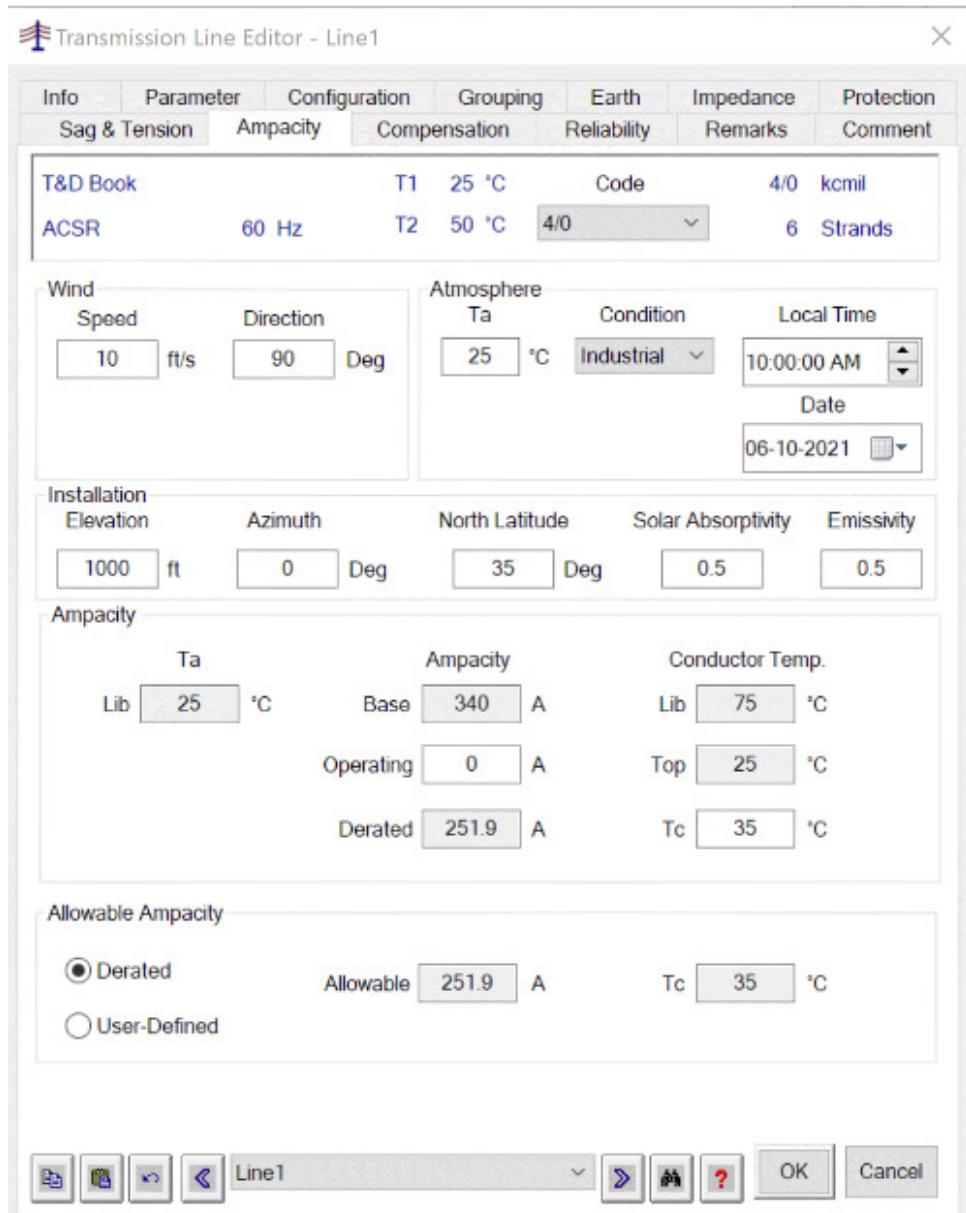


**Figura 46 – Interface da ferramenta para o cálculo de Flecha e Tração no cabo.**

**Fonte:** O autor, adaptado de (Technology 2019).

### 3.3.3.3.2 Ampacidade (Ampacity)

Baseada na norma IEEE 738-2012 (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2001), esta ferramenta (Figura 47) calcula a capacidade máxima de condução de corrente de um cabo aéreo sem que sua temperatura exceda um limite de segurança. A análise é feita a partir do balanço de calor entre o aquecimento por efeito Joule e radiação solar, e o resfriamento por convecção (vento) e radiação térmica.

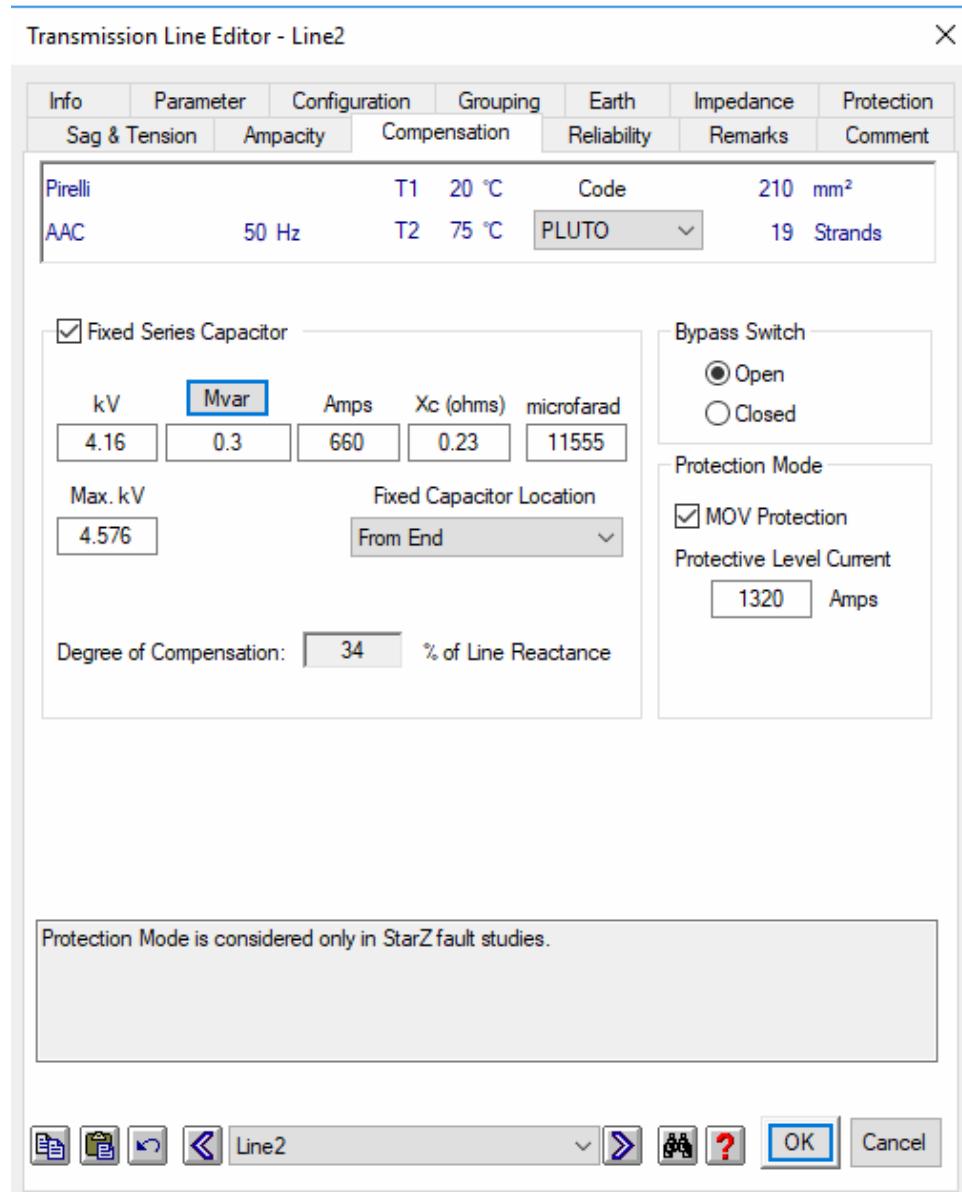


**Figura 47 – Interface da ferramenta de cálculo de ampacidade.**

**Fonte:** O autor, adaptado de (Technology 2019).

### 3.3.3.3.3 Compensação (Compensation)

A aba *Compensation* (Figura 48) é utilizada para modelar equipamentos de compensação série e paralela (shunt). A compensação série (bancos de capacitores) visa reduzir a reatância indutiva da linha para aumentar a capacidade de transmissão, enquanto a compensação paralela (reatores) absorve o excesso de reativos gerados pela linha em carga leve, evitando sobretensões.



**Figura 48 – Interface da ferramenta de compensação para linhas de transmissão.**  
Fonte: O autor, adaptado de (Technology 2019).

### 3.3.4 Modelagem de Linhas de Transmissão no PTW

O software PTW (*Power-Tool for Windows*) oferece duas abordagens principais para a modelagem de circuitos de linhas: o elemento dedicado **Transmission Line**, que permite uma representação detalhada, e o elemento **Impedância PI**, que funciona como um modelo genérico simplificado. Para os propósitos deste trabalho, será utilizada a modelagem completa através do elemento *Transmission Line*. A Figura 49 ilustra a localização destes componentes na interface do software.



Figura 49 – Localização dos elementos *Transmission Line* e *Impedância PI* no PTW.

Fonte: O autor.

Após a inserção do elemento no diagrama unifilar, sua configuração é realizada através de uma interface com múltiplas abas (*subviews*). A aba inicial (Figura 50) concentra os dados gerais da linha, como seu comprimento, e oferece recursos para modelar a compensação de reativos, como a inclusão de um **Reator Shunt (Shunt Reactor)** para compensação paralela ou a definição de um percentual de **Compensação Série (% Series Compensation)**. Esta última opção permite neutralizar parte da reatância indutiva ( $X_L$ ) da linha, aumentando a capacidade de transmissão de potência e melhorando a estabilidade do sistema.

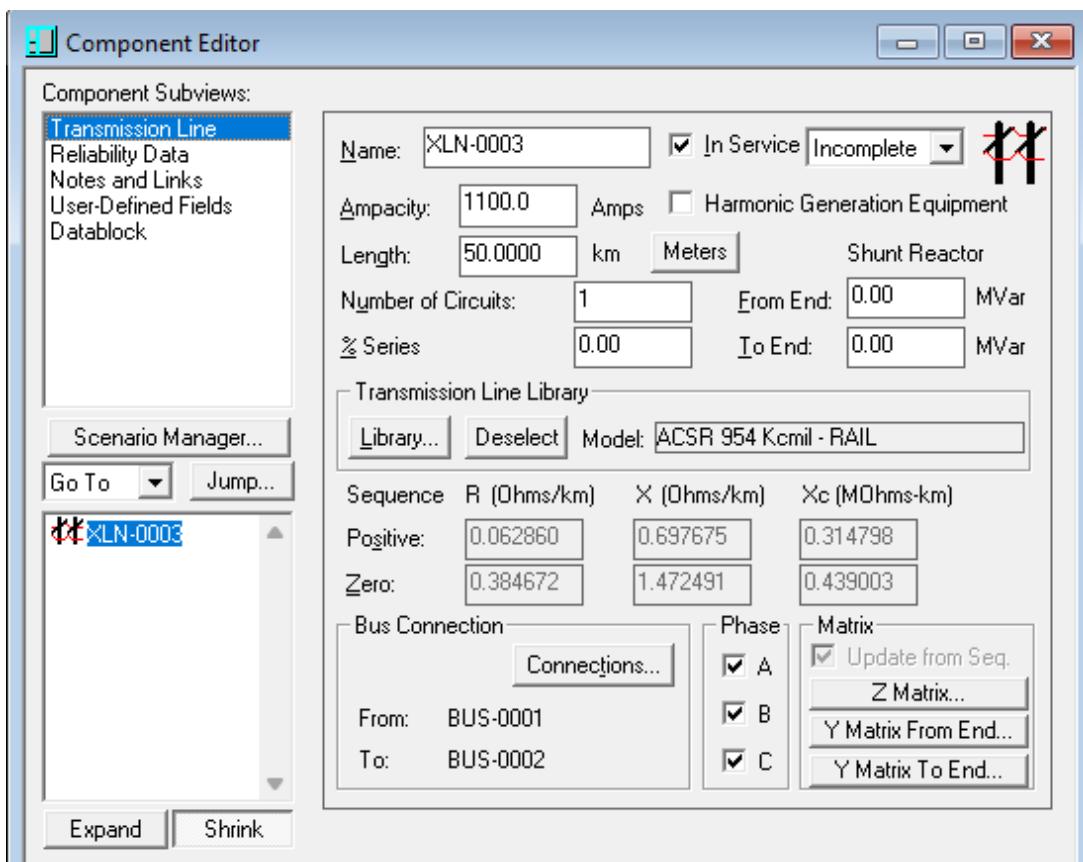


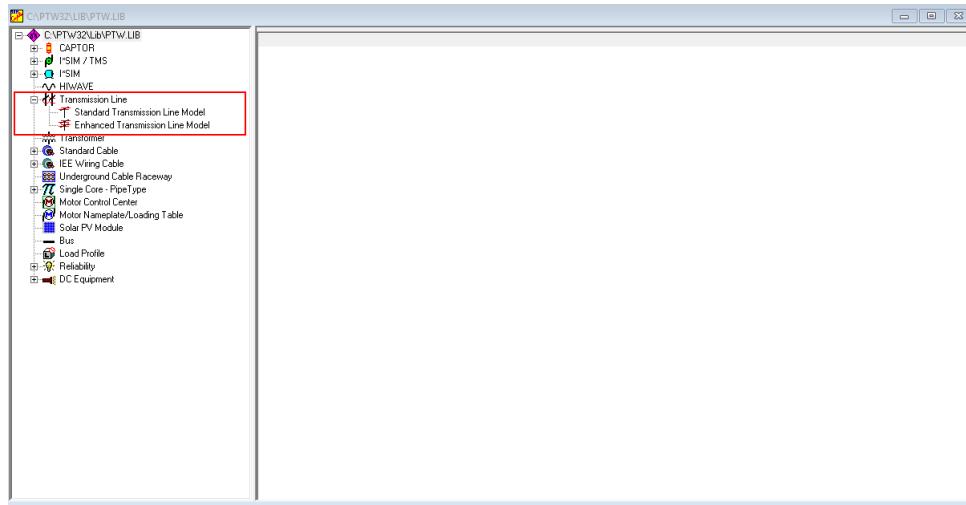
Figura 50 – Interface principal de configuração do elemento de linha de transmissão no PTW.

Fonte: O autor.

### 3.3.4.1 Modelos de Linha na Biblioteca do PTW

Para uma definição detalhada de seus parâmetros, o elemento *Transmission Line* pode ser associado a modelos pré-configurados na biblioteca do software, acessível pelo menu *Document > Library*. Conforme ilustrado na Figura 51, a biblioteca disponibiliza dois métodos principais para essa definição. Para este trabalho, os valores utilizados na modela-

gem foram extraídos dos catálogos da (Alubar Altec 2022) e complementados com dados da (Southwire Company 2007).

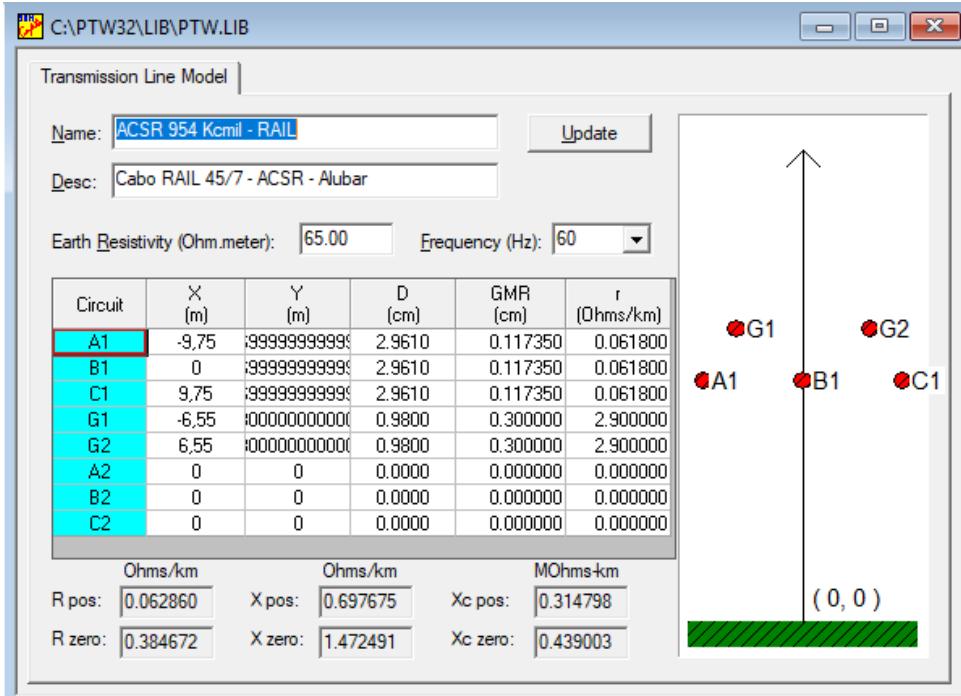


**Figura 51 – Interface da biblioteca do PTW para modelos de linhas de transmissão.**

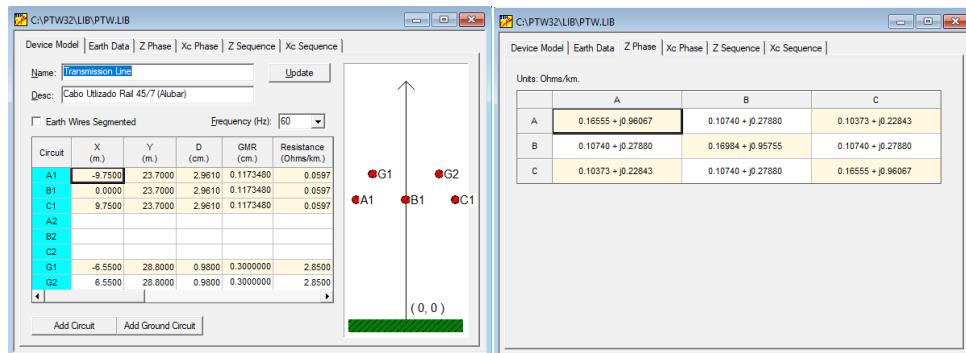
**Fonte:** O autor.

Os dois modelos são detalhados a seguir, com suas respectivas interfaces ilustradas nas Figuras 52 e 53

- **Standard Transmission Line Model:** É a representação simplificada de uma linha, definida diretamente por seus parâmetros elétricos finais, como as **impedâncias de sequência positiva ( $Z_1$ ) e zero ( $Z_0$ )**. Este modelo é ideal para a maioria dos estudos, especialmente quando os dados de impedância já são conhecidos e a linha não possui acoplamento mútuo significativo com outros circuitos.
- **Enhanced Transmission Line Model:** É o modelo mais detalhado e preciso, projetado para analisar linhas que possuem **acoplamento mútuo** com circuitos paralelos. Diferente do modelo Standard, ele calcula as impedâncias a partir de **dados físicos e geométricos** detalhados. Seu uso é fundamental para garantir a precisão de estudos de **curto-circuitos assimétricos** (especialmente faltas à terra) em corredores com múltiplas linhas.



**Figura 52 – Interface do *Standard Transmission Line Model* na biblioteca do PTW.**  
Fonte: O autor.



**Figura 53 – Interface do *Enhanced Transmission Line Model*, que considera acoplamento mútuo.**  
Fonte: O autor.

É importante ressaltar que a interface de modelagem da linha de transmissão no PTW foca na definição de seus parâmetros elétricos; a configuração da **curva de dano térmico do condutor** não é realizada nesta etapa. Conforme discutido, o passo crítico da modelagem é o estabelecimento da **impedância do circuito**. É esta impedância que **limita e determina a magnitude da corrente de curto-circuito** que percorrerá a linha a partir das fontes do sistema, valor este que servirá de base para o estudo de proteção subsequente.

### 3.3.5 Quadro Comparativo e Conclusões da Seção da Linha de Trasmissão

A análise comparativa, consolidada na Tabela 4, evidencia as diferentes filosofias e pontos fortes de cada software na modelagem de linhas. O DIgSILENT PowerFactory se destaca

pela sua estrutura de dados robusta e hierárquica, ideal para a padronização em grandes sistemas. O ETAP oferece a suíte de ferramentas de análise mais completa e integrada, abrangendo não apenas os aspectos elétricos, mas também mecânicos e térmicos em uma única interface. Por fim, o PTW apresenta um modelo avançado e explícito para a análise de acoplamento mútuo, crucial para estudos de proteção de alta precisão em redes complexas.

**Tabela 4 – Quadro Comparativo da Modelagem de Linhas de Transmissão e Cabos.**

**Fonte:** O autor.

Funcionalidade	DIGSILENT PowerFactory	ETAP	PTW (SKM)
<b>Filosofia de Modelagem</b>	Estrutura de dois níveis: <b>Tipo</b> (Typ...) para dados técnicos reutilizáveis e <b>Elemento</b> (Elm...) para a instância no diagrama.	Objeto único com múltiplas <b>páginas</b> . Ícones distintos na biblioteca para Linha de Transmissão, Cabo e Impedância.	Objeto único com múltiplas <b>sub-vistas</b> . Ícones distintos para Linha de Transmissão e Impedância PI.
<b>Métodos de Entrada de Dados</b>	Dois modos no "Tipo": <b>Hierárquico</b> (cálculo a partir da geometria da torre) ou <b>entrada direta</b> de parâmetros de sequência.	Dois modos na página "Impedance": <b>Calculado</b> (a partir da geometria e biblioteca de condutores) ou <b>User-Defined</b> (entrada direta).	Dois modelos na biblioteca: <b>Standard</b> (entrada direta de impedâncias de sequência) ou <b>Enhanced</b> (cálculo por geometria).
<b>Análise de Acoplamento Mútuo</b>	Calculado implicitamente no modelo detalhado a partir da geometria da torre.	Configurado na página "Grouping" do elemento de linha.	Funcionalidade central e explícita do modelo " <b>Enhanced</b> ", projetado para analisar circuitos paralelos com precisão.
<b>Ferramentas Adicionais</b>	Foco no cálculo de parâmetros elétricos. Outras análises (ex: ampacidade) em módulos separados.	Extensivo e integrado ao elemento: <b>Sag/Tension</b> (Flecha e Tração), <b>Ampacity</b> (Ampacidade) e <b>Compensation</b> .	Compensação Série e Shunt integradas diretamente na interface principal de configuração.
<b>Diferencial Notável</b>	Estrutura hierárquica e reutilizável de "Tipos", ideal para a gestão e padronização de grandes redes elétricas.	Conjunto mais completo de ferramentas de engenharia (elétrica, mecânica, térmica) em um único elemento de linha.	Modelo "Enhanced" focado em acoplamento mútuo, oferecendo alta precisão para estudos de falta assimétrica em corredores de linhas.

### *3.3.5.0.1 Conclusão da Análise*

A análise comparativa, consolidada na Tabela 4, evidencia as diferentes filosofias e pontos fortes de cada software na modelagem de linhas. O DIgSILENT *PowerFactory* se destaca pela sua estrutura de dados robusta e hierárquica, ideal para a padronização em grandes sistemas. O ETAP oferece a suíte de ferramentas de análise mais completa e integrada, abrangendo não apenas os aspectos elétricos, mas também mecânicos e térmicos em uma única interface. Por fim, o PTW apresenta um modelo avançado e explícito para a análise de acoplamento mútuo, crucial para estudos de proteção de alta precisão em redes complexas.

## **3.4 Transformadores de Força**

O transformador de força é um equipamento elétrico estático que transfere energia entre circuitos por indução eletromagnética, alterando os níveis de tensão e corrente com frequência constante (Chapman 2013). Sua importância para o SEP é absoluta, atuando em duas frentes principais. Na geração, **transformadores elevadores** aumentam a tensão para permitir a transmissão de energia por longas distâncias com mínimas perdas por efeito Joule ( $P = I^2R$ ), viabilizando economicamente o sistema (Chapman 2013). Próximo aos centros de consumo, **transformadores abaixadores** reduzem a tensão progressivamente para níveis seguros e adequados para a distribuição e o uso final em indústrias e residências (Filho 2017). Dessa forma, o transformador é o componente que confere flexibilidade, eficiência e segurança ao SEP, permitindo que cada etapa, da geração ao consumo, opere em seu nível de tensão ótimo.

### 3.4.0.1 Definição do Estudo de Caso Modelagem

Para contextualizar a análise e aplicar os conceitos teóricos em um cenário prático, será utilizado como estudo de caso um transformador de força comercial da marca WEG, cujos dados técnicos foram extraídos de sua folha de dados (WEG Equipamentos Elétricos S.A. 2025). A Tabela 5 consolida os principais parâmetros deste equipamento, que servirão como base para a modelagem comparativa nas plataformas de software analisadas.

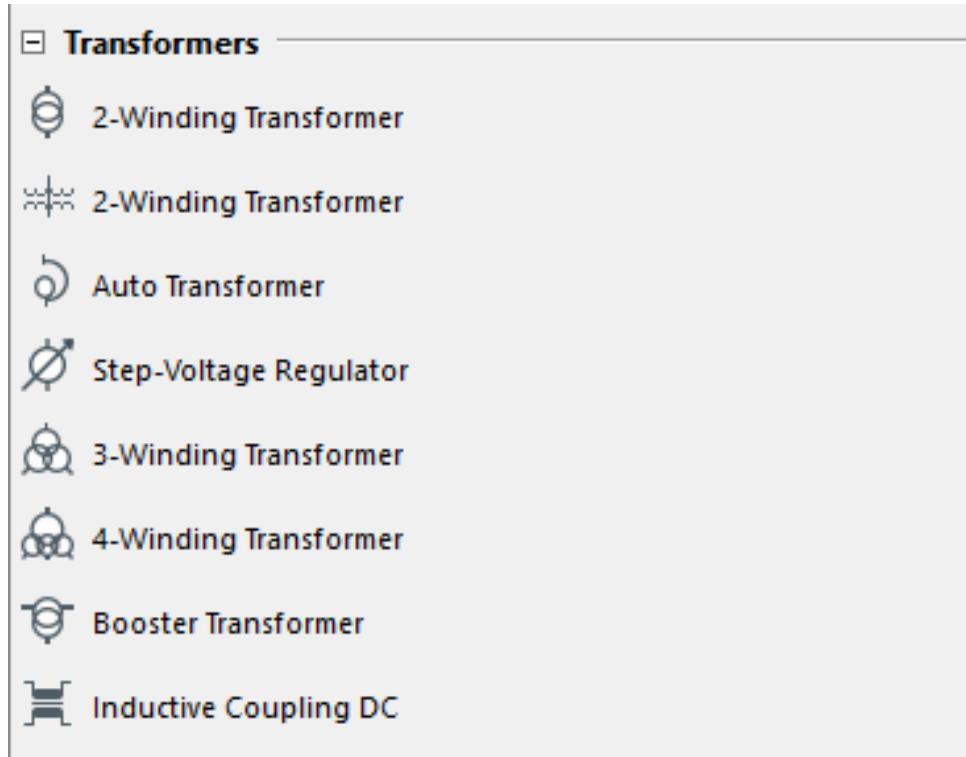
**Tabela 5 – Dados Técnicos Consolidados do Transformador de Força WEG (20 MVA, 138/13.8 kV).**

<b>Dados Nominais e Enrolamentos</b>			
Potência (ONAF)	20.000 MVA	Frequência	60.0 Hz
Grupo de Ligação	Dyn1	Tensão AT	138.0 kV (+/- 8x1.25%)
Ligação AT	Triângulo	Tensão BT	13.8 kV
Ligação BT	Estrela	Comutação	CDC
<b>Perdas e Impedância (@ 85.0°C)</b>			
Perdas em Vazio	22.0 kW	Perdas em Carga	150.0 kW
Impedância (%)	12.5 %	Corrente de Excitação (%)	0.43 %
<b>Rendimento (%) em Função do Fator de Potência</b>			
<b>Fator de Carga (%)</b>	<b>ONAF (<math>\Phi = 0.8</math>)</b>	<b>ONAF (<math>\Phi = 0.9</math>)</b>	<b>ONAF (<math>\Phi = 1.0</math>)</b>
25	99.38	99.44	99.50
50	99.41	99.47	99.53
75	99.30	99.37	99.44
100	99.15	99.24	99.32
<b>Regulação de Tensão (%) com 100% de Carga</b>			
<b>Fator de Carga (%)</b>	<b>ONAF (<math>\Phi = 0.8</math>)</b>	<b>ONAF (<math>\Phi = 0.9</math>)</b>	<b>ONAF (<math>\Phi = 1.0</math>)</b>
100	8.4	4.885	1.37

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em (WEG Equipamentos Elétricos S.A. 2025).

### 3.4.1 Modelagem do Transformador no DIgSILENT PowerFactory

Para inserir um transformador no diagrama unifilar do DIgSILENT PowerFactory, o usuário seleciona o componente na **paleta de ferramentas de desenho (Drawing Tools)**. A plataforma oferece diversos modelos, mas para este trabalho, a análise foca no **transformador de dois enrolamentos**, representado pelo elemento ElmTr2 (Figura 54). De forma análoga aos geradores, sua parametrização segue a filosofia de dois níveis: o **Elemento**, que é a instância no diagrama, e o **Tipo**, que armazena os dados de engenharia.



**Figura 54 – Localização do elemento ElmTr2 na paleta de ferramentas de desenho.**

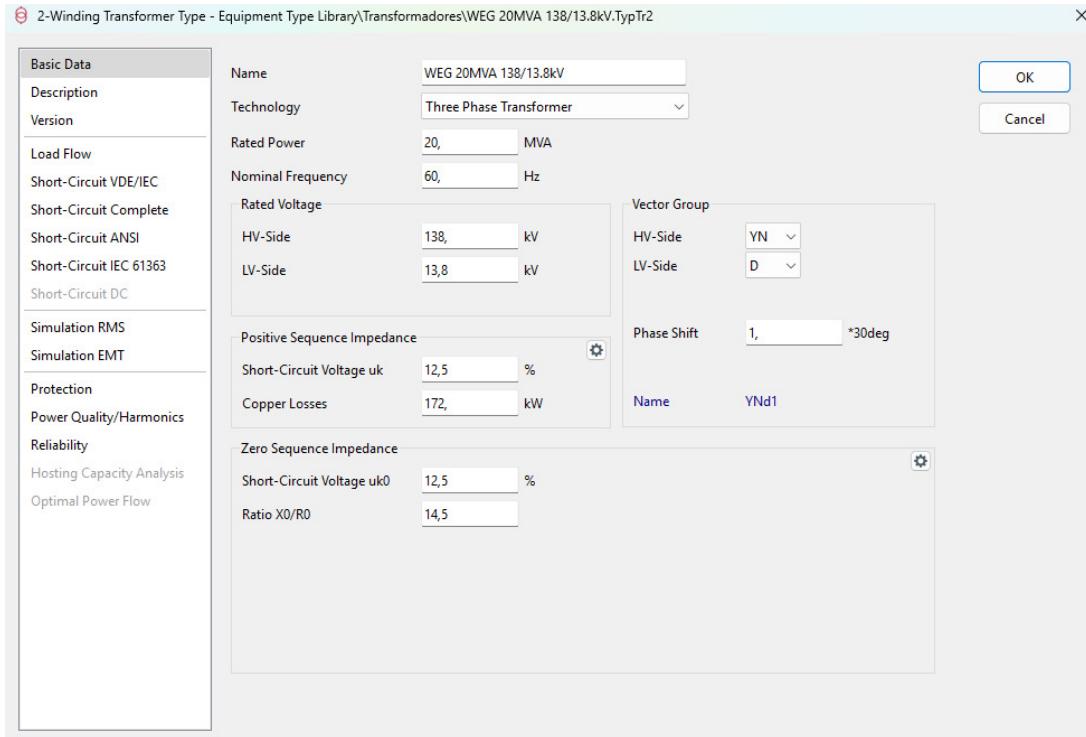
**Fonte:** O autor.

### 3.4.1.1 Configuração do Tipo de Transformador (TypTr2)

A definição do TypTr2 é a etapa mais detalhada, pois este objeto funciona como a biblioteca de dados técnicos do equipamento.

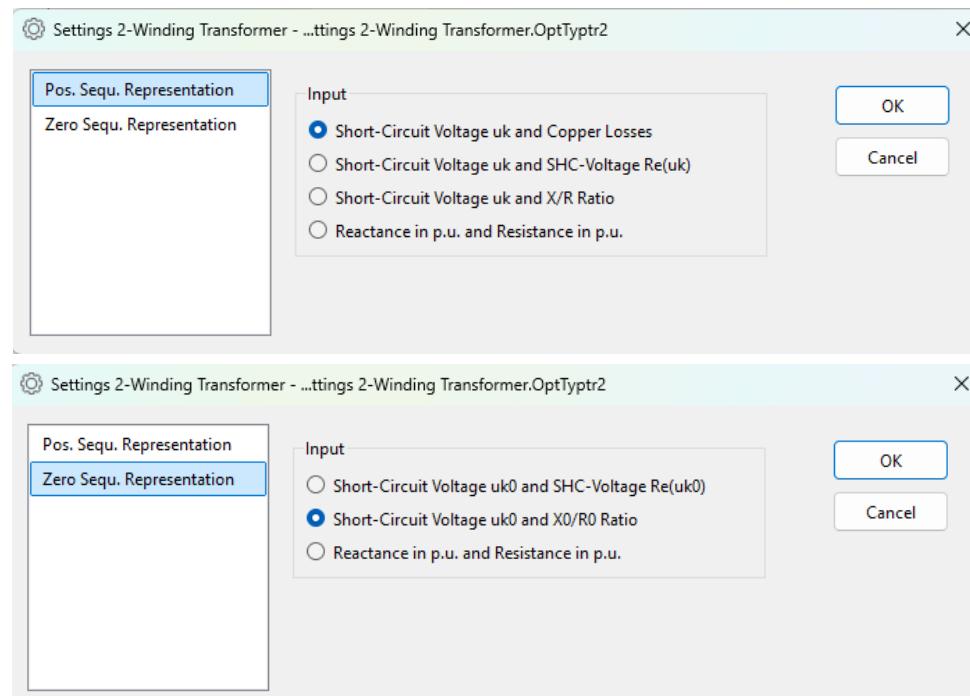
#### *3.4.1.1.1 Aba Basic Data*

Nesta aba (Figura 55), são definidos os dados de placa, como potência nominal, tensões e grupo de ligação. O campo “Technology” oferece grande flexibilidade, permitindo alterar a configuração exibida de transformador trifásico para outras topologias, como monofásicos e sistemas especiais do tipo Monofilar com Retorno por Terra (MRT) — nomenclatura técnica para o *Single Wire Earth Return* (SWER).



**Figura 55 – Interface *Basic Data* para a configuração do Tipo (TypTr2).**

**Fonte:** O autor.

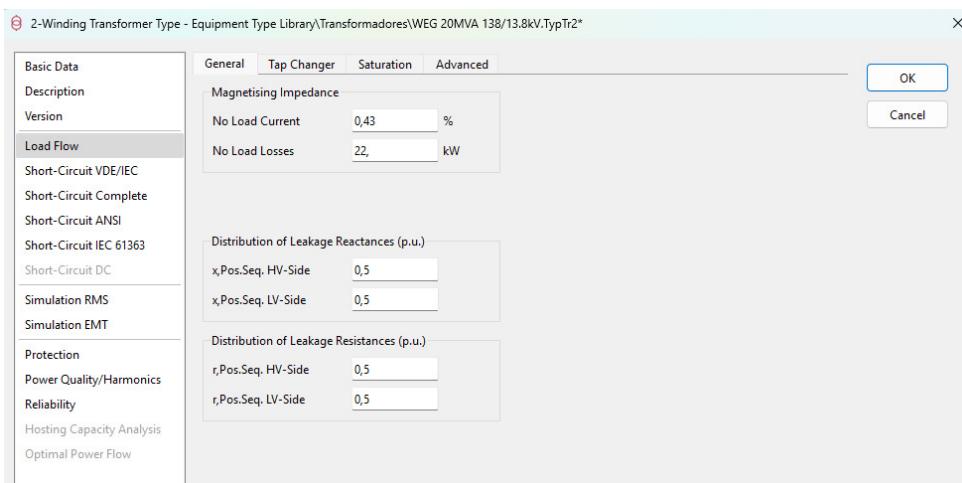


**Figura 56 – Flexibilidade de entrada de dados de impedância de sequência no TypTr2.**

**Fonte:** O autor.

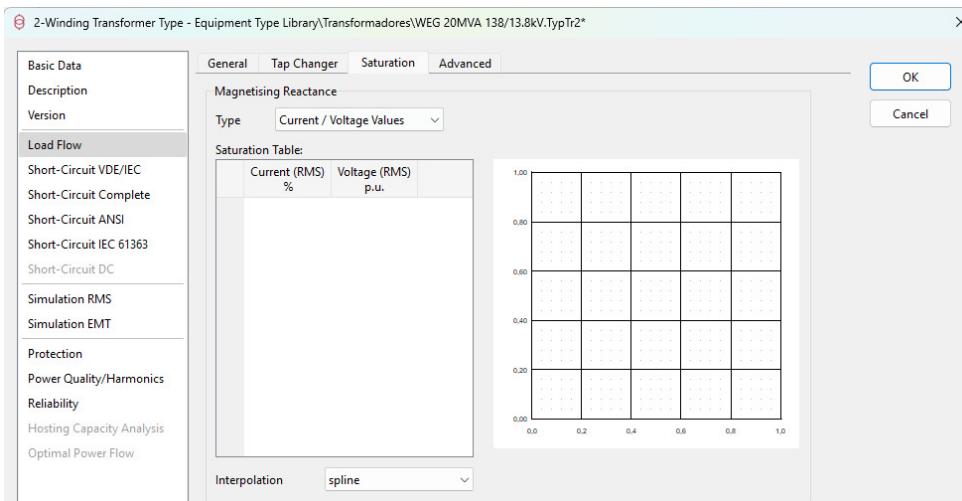
### 3.4.1.1.2 Aba Load Flow

Nesta aba (Figura 57), são definidos os parâmetros do **modelo T equivalente**. A **Impedância de Magnetização**, crucial para estudos de fluxo de potência e transitórios (EMT), é parametrizada a partir das perdas e corrente a vazio. A **Distribuição das Reatâncias de Dispersione** entre os enrolamentos também é definida aqui, sendo relevante para estudos de proteção. O software ainda permite modelar a curva de saturação do núcleo de forma não-linear (Figura 58) e a **Adaptação da Relação do Transformador** para estudos de altíssima precisão. Para este trabalho, adotou-se o modelo linear padrão.



**Figura 57 – Interface de configuração do modelo T equivalente na aba Load Flow.**

**Fonte:** O autor.

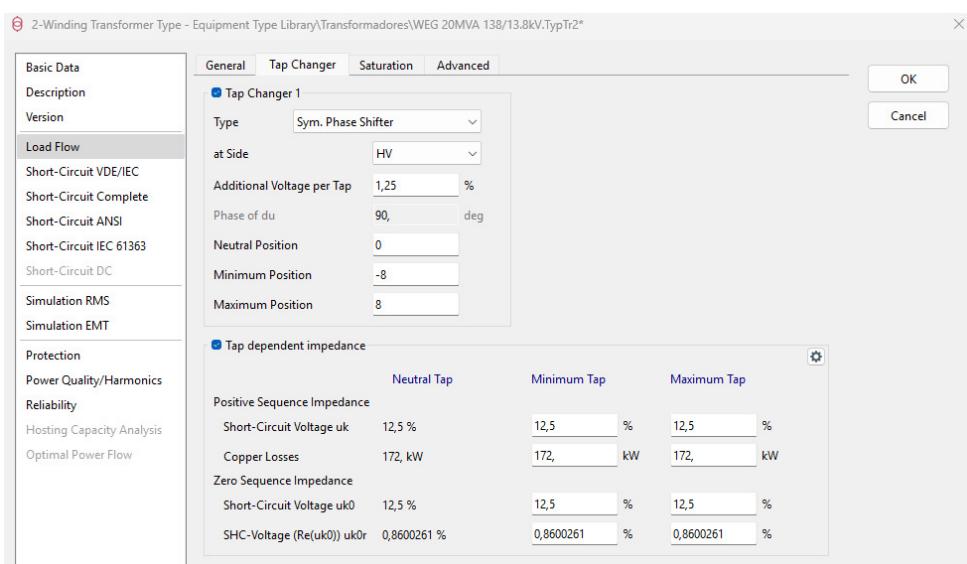


**Figura 58 – Interface para modelagem da curva de saturação do núcleo.**

**Fonte:** O autor.

### 3.4.1.1.3 Aba Tap Changer

O PowerFactory oferece um alto grau de detalhamento para a modelagem do Comutador Sob Carga (CDC), como visto na Figura 59. Recursos avançados como a modelagem de Transformadores Defasadores (PSTs) e a **Impedância Dependente do Tap**, que reflete a variação da impedância com a posição do comutador, estão disponíveis. Diante da indisponibilidade de dados de ensaios de fábrica, adotou-se a abordagem padrão de considerar a impedância constante no tap nominal.

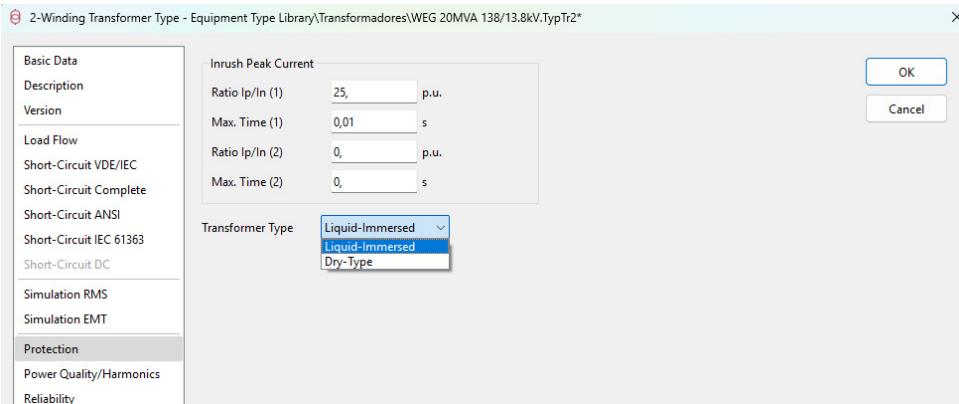


**Figura 59 – Interface de configuração detalhada do comutador de taps.**

**Fonte:** O autor.

### 3.4.1.1.4 Aba Protection

Nesta aba (Figura 60), são definidos os limites para a coordenação da proteção. A **corrente de inrush** é modelada por dois pontos (pico inicial e cauda de decaimento) para evitar atuações indevidas na energização. A **curva de dano térmico** é definida com base no **Tipo de Transformador** (*Liquid-Immersed* ou *Dry-Type*), o que é crucial para estabelecer o limite de suportabilidade do equipamento.



**Figura 60 – Interface de parâmetros de proteção no TypTr2.**

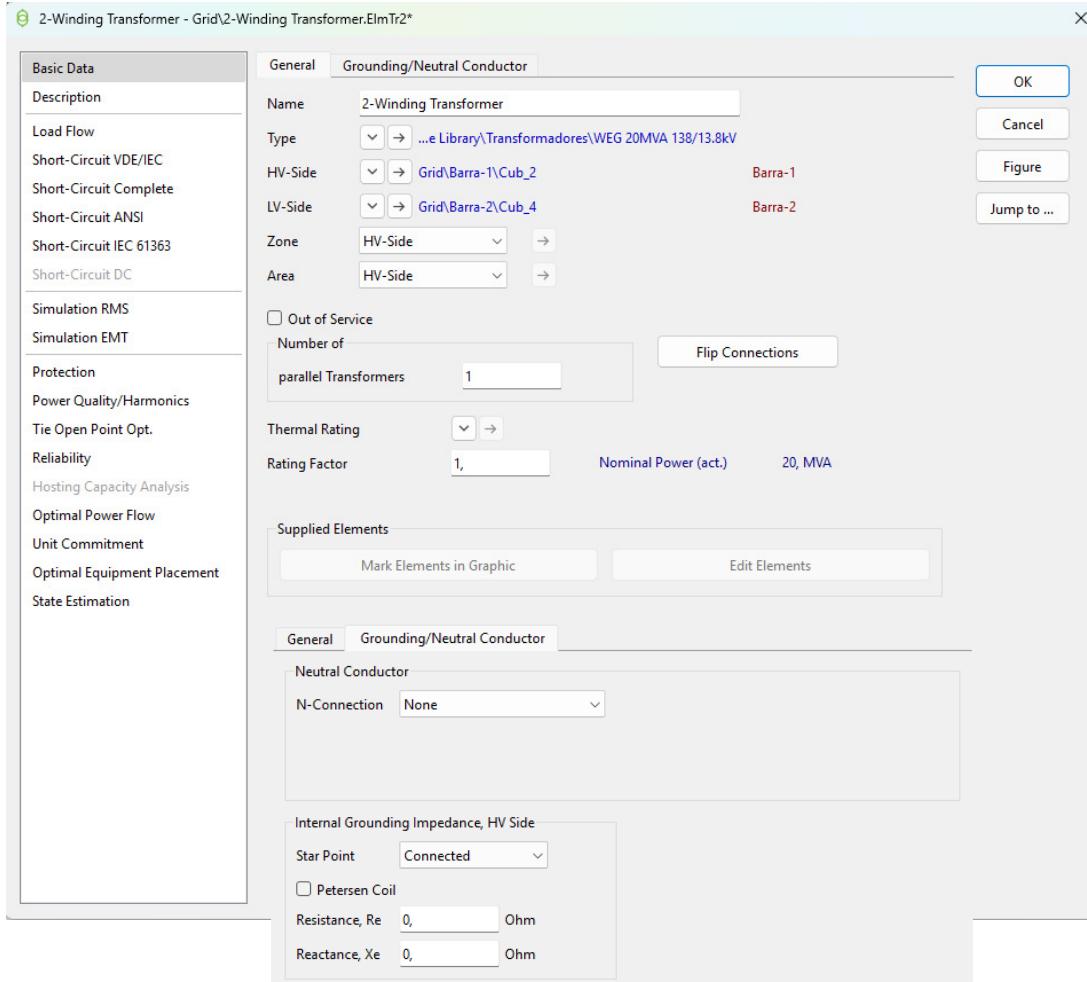
**Fonte:** O autor.

### 3.4.1.2 Configuração do Elemento no Diagrama (ElmTr2)

Com o Tipo definido, a configuração do Elemento foca-se nos seus dados operacionais para cada estudo específico. A interface do ElmTr2 permite ao usuário gerenciar o estado e o comportamento do transformador na rede.

#### *3.4.1.2.1 Aba Basic Data*

A aba principal do elemento (Figura 61) é onde se realiza a conexão fundamental: a associação do ElmTr2 ao seu respectivo TypTr2. Além disso, ela oferece funcionalidades operacionais importantes, como a modelagem de múltiplas unidades idênticas em **paralelo** (sem a necessidade de desenhá-las) e a configuração detalhada do **aterramento** do neutro, incluindo a opção de Bobina de Petersen.

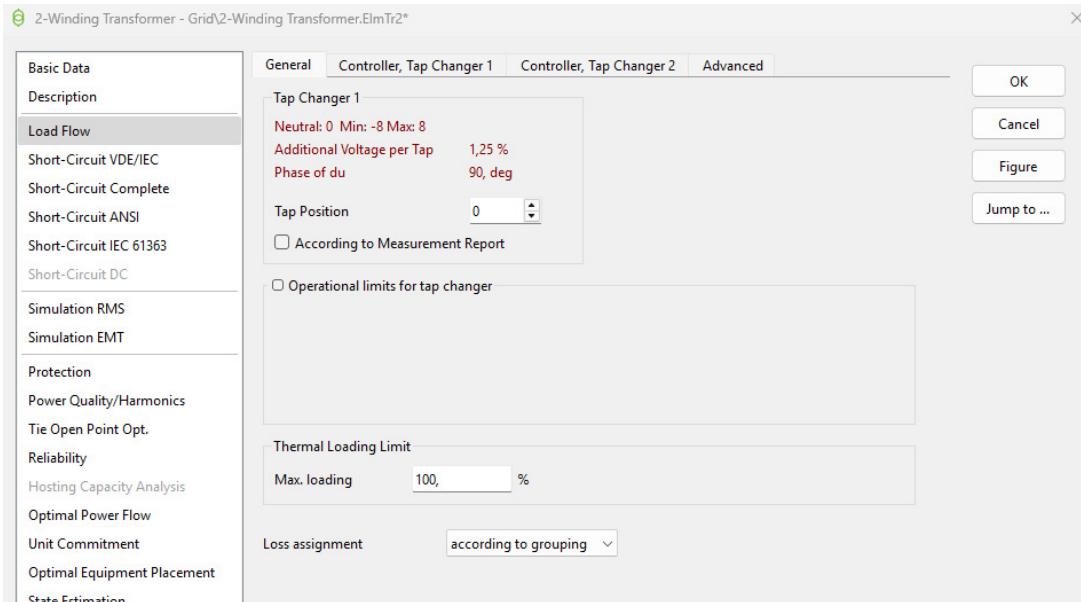


**Figura 61 – Interface da aba *Basic Data* do elemento ElmTr2.**

**Fonte:** O autor.

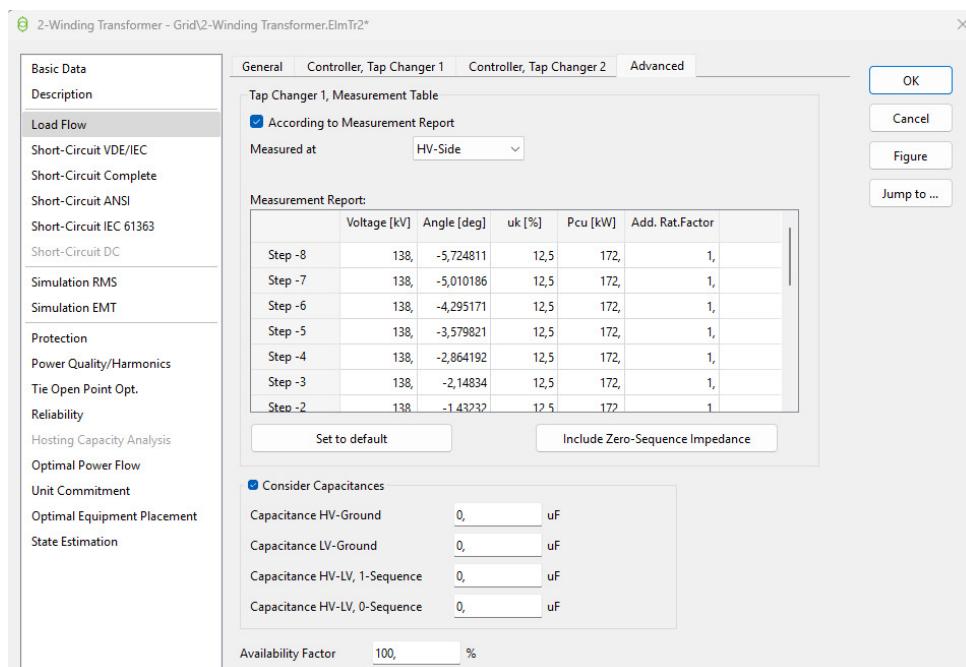
### 3.4.1.2.2 Aba Load Flow

Nesta aba (Figura 62), gerencia-se o estado operacional do comutador de tapes, definindo sua posição inicial e seu modo de controle (automático, fixo ou externo). A aba *Advanced* (Figura 63) permite habilitar modelos de maior fidelidade configurados no Tipo, como a curva de regulação não-linear (*According to Measurement Report*) e as capacitâncias internas do transformador.



**Figura 62 – Interface de configuração do *Load Flow* no elemento ElmTr2.**

**Fonte:** O autor.



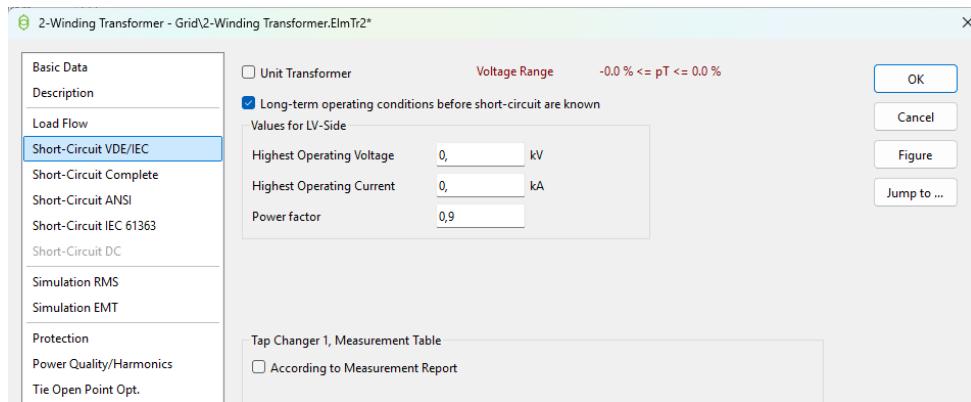
**Figura 63 – Interface da aba *Advanced* do elemento ElmTr2.**

**Fonte:** O autor.

### 3.4.1.2.3 Aba Short-Circuit VDE/IEC

Para estudos de curto-circuito (Figura 64), esta aba permite definir as condições pré-falta. O usuário pode designar o transformador como ‘Unit Transformer’ (de usina) para aplicar os fatores de correção da norma IEC 60909, ou especificar **condições de operação conhecidas**.

cidas para um cálculo mais preciso da tensão pré-falta, resultando em uma análise de curto-círcito mais acurada.



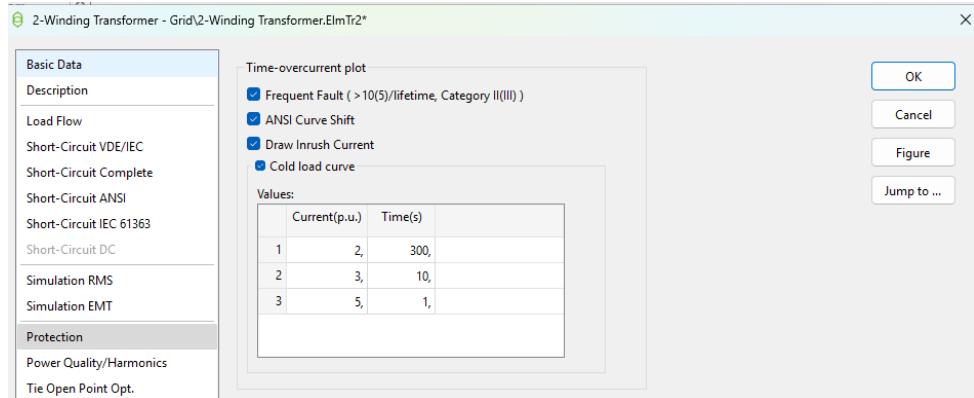
**Figura 64 – Interface de configuração de Curto-Círcuito no elemento ElmTr2.**

**Fonte:** O autor.

#### 3.4.1.2.4 Aba Protection

A aba de proteção do elemento oferece ferramentas visuais para a correta coordenação dos dispositivos de proteção. As seguintes opções podem ser habilitadas para exibição no gráfico tempo-corrente (TCC), fornecendo os limites de atuação e restrição dentro dos quais a curva do relé deve ser ajustada:

- **Frequent Fault:** Plota uma curva de dano térmico mais conservadora, para sistemas com alta frequência de faltas.
- **ANSI Curve Shift:** Desloca a curva de dano para considerar o efeito térmico da componente DC da corrente de falta.
- **Draw Inrush Current:** Exibe os pontos de restrição da corrente de magnetização (inrush), definindo uma zona de não atuação para o relé durante a energização.
- **Cold load curve:** Desenha a curva de carga fria (*Cold Load Pickup*), que também representa uma condição operacional normal na qual o relé não deve atuar.



**Figura 65 – Interface de configuração da Curva de Dano no elemento ElmTr2.**

**Fonte:** O autor.

### 3.4.2 Modelagem do Transformador no ETAP

A modelagem de transformadores no ETAP inicia-se com a seleção do componente apropriado em sua interface gráfica. O software oferece uma biblioteca com diversos tipos de transformadores, incluindo modelos de três enrolamentos, zig-zag e com delta aberto. Para este trabalho, a análise será concentrada no **transformador de dois enrolamentos**, pois é o tipo utilizado no estudo de caso. A Figura 66 ilustra a localização deste elemento na barra de ferramentas do ETAP.



**Figura 66 – Localização do elemento de transformador de dois enrolamentos no ETAP.**

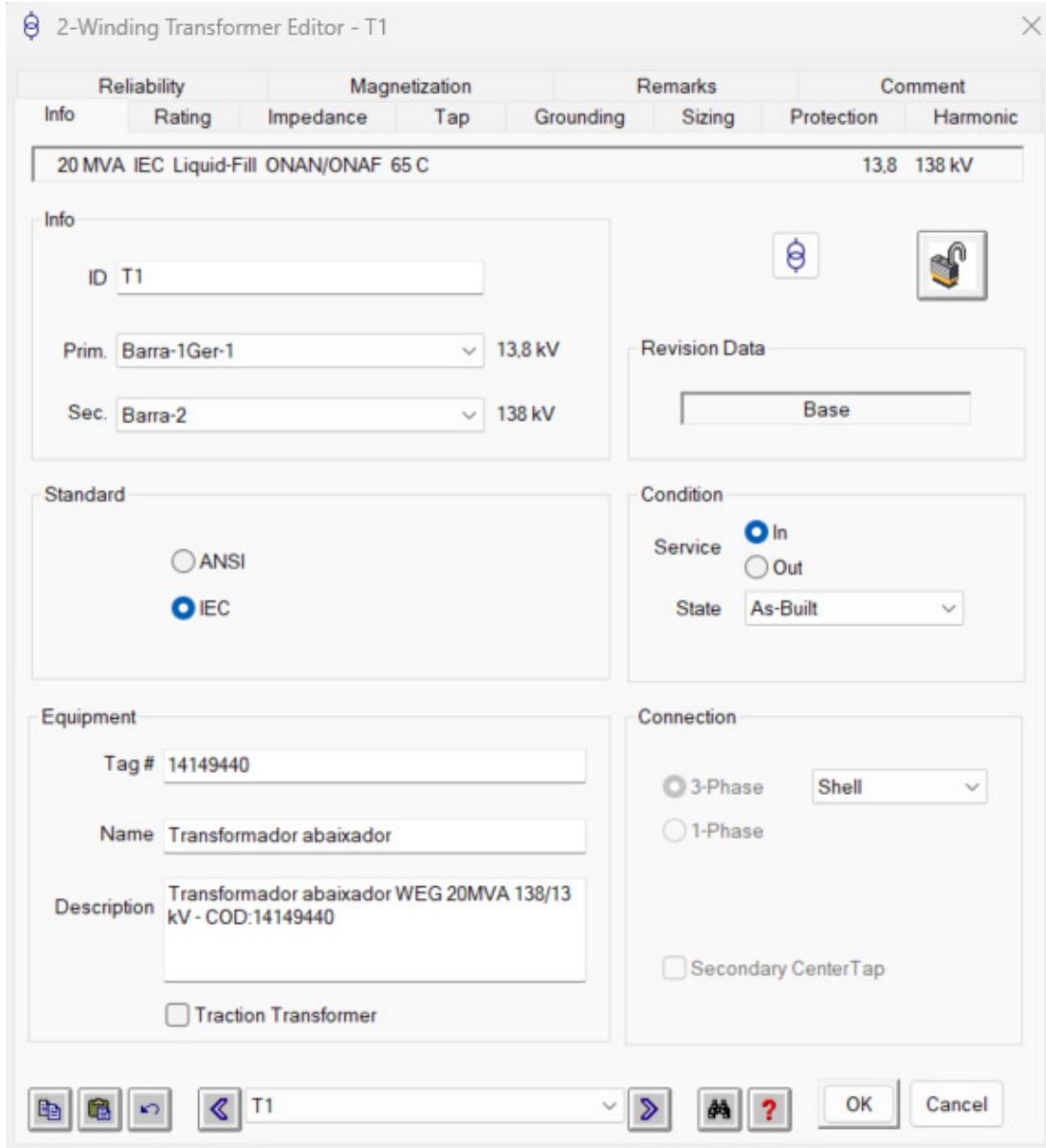
**Fonte:** O autor.

A configuração do equipamento é realizada através de um editor com múltiplas abas ("Pages"). A seguir, são detalhadas as principais abas utilizadas neste estudo.

#### 3.4.2.1 Página de Informações Gerais (Info)

A aba **Info**, ilustrada na Figura 67, é a interface primária para a modelagem de um transformador, onde são definidos seus dados de identificação, o padrão normativo e sua topologia construtiva. A correta parametrização nesta etapa é um pré-requisito para a precisão de todos os estudos subsequentes. Os parâmetros mais críticos a serem configurados são:

- **Norma Aplicável (*Standard*):** Define o conjunto de regras e convenções de cálculo que o software utilizará. Para transformadores fabricados sob a norma brasileira **NBR 5356** (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2012), a seleção correta é **IEC**, devido à harmonização técnica entre as normas da ABNT e da IEC. A utilização do padrão ANSI, com suas metodologias distintas, resultaria em uma modelagem incorreta do equipamento.
- **Configuração da Conexão (*Connection*):** Esta seção detalha a construção física e elétrica do transformador, com impacto direto no seu comportamento em regime e, principalmente, durante faltas.
  - **Tipo Construtivo do Núcleo (*Core Type*):** Configuração crítica que define a construção do núcleo magnético. A escolha (ex: *Core*, *3 Limb* vs. *Shell*) determina o caminho do fluxo de sequência zero e, consequentemente, o valor da **impedância de sequência zero ( $Z_0$ )**, parâmetro essencial para a precisão dos estudos de curto-circuito.
  - **Seleção de Fases:** A definição do transformador como trifásico ou monofásico é bloqueada uma vez que o equipamento é conectado a um barramento no diagrama unifilar, garantindo a consistência topológica do modelo.
  - **Outras Topologias:** A interface também permite modelar configurações específicas, como um **banco de três transformadores monofásicos ((3) 1-Phase)**, que possui características de  $Z_0$  distintas de uma unidade trifásica única, ou transformadores de distribuição com **derivação central no secundário (*Secondary Center Tap*)**.



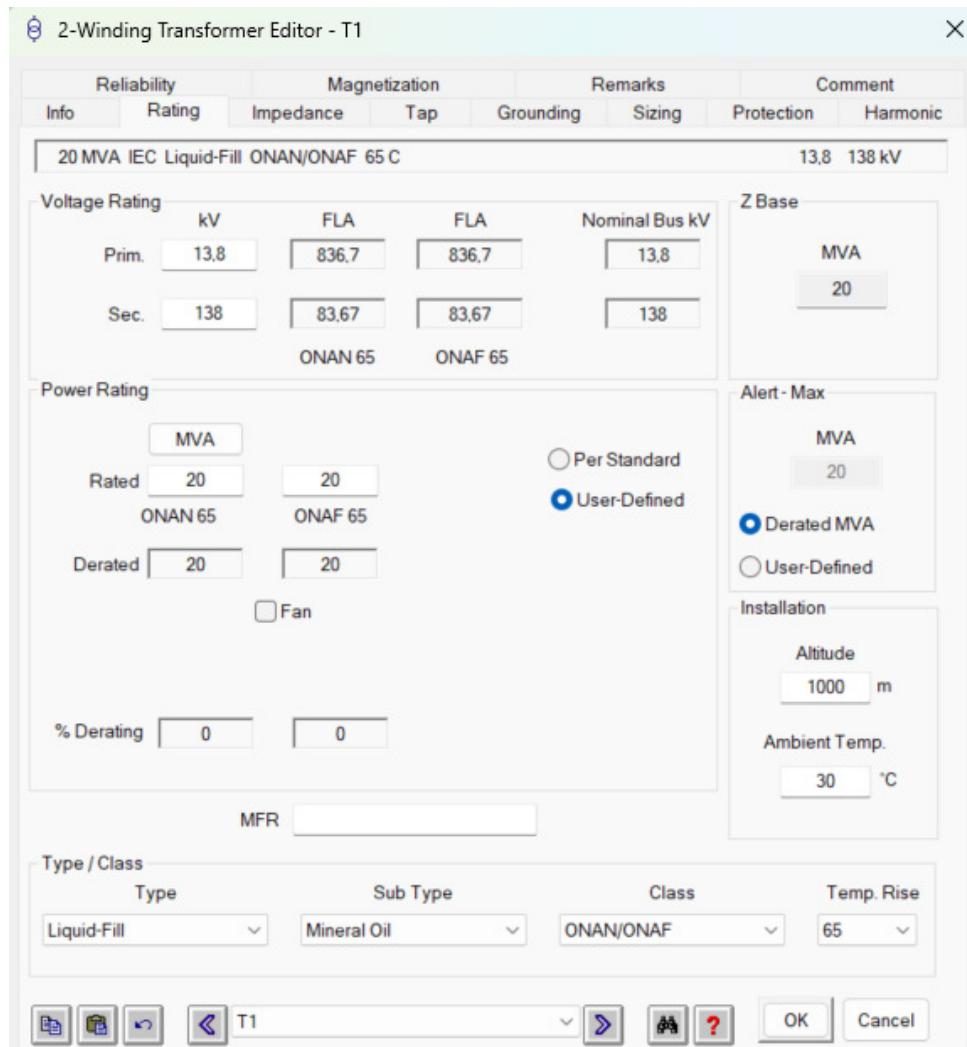
**Figura 67 – Interface de configuração da página *Info* do transformador.**

**Fonte:** O autor.

### 3.4.2.2 Página de Dados Nominais (Rating)

A aba *Rating* do editor de transformadores no ETAP é a interface fundamental onde são definidos os limites nominais elétricos, térmicos e operacionais do equipamento. Mais do que apenas uma potência máxima, esta página permite detalhar as múltiplas potências nominais associadas a cada estágio de resfriamento (como ONAN e ONAF), com suas respectivas correntes de plena carga (FLA). Crucialmente, ela permite ajustar a capacidade do transformador (através do *derating*) com base nas condições ambientais reais de instalação, como altitude e temperatura ambiente. Adicionalmente, estabelece a potência base (*Z Base*), que é essencial para a correta conversão da impedância percentual, e define a classe de isolamento térmico do transformador através da elevação de temperatura (Temp. Rise). Em conjunto, estes parâme-

tros garantem que o modelo no ETAP represente fielmente a capacidade operacional real e os limites seguros do transformador.



**Figura 68 – Interface de configuração da página *Rating*.**

**Fonte:** O autor.

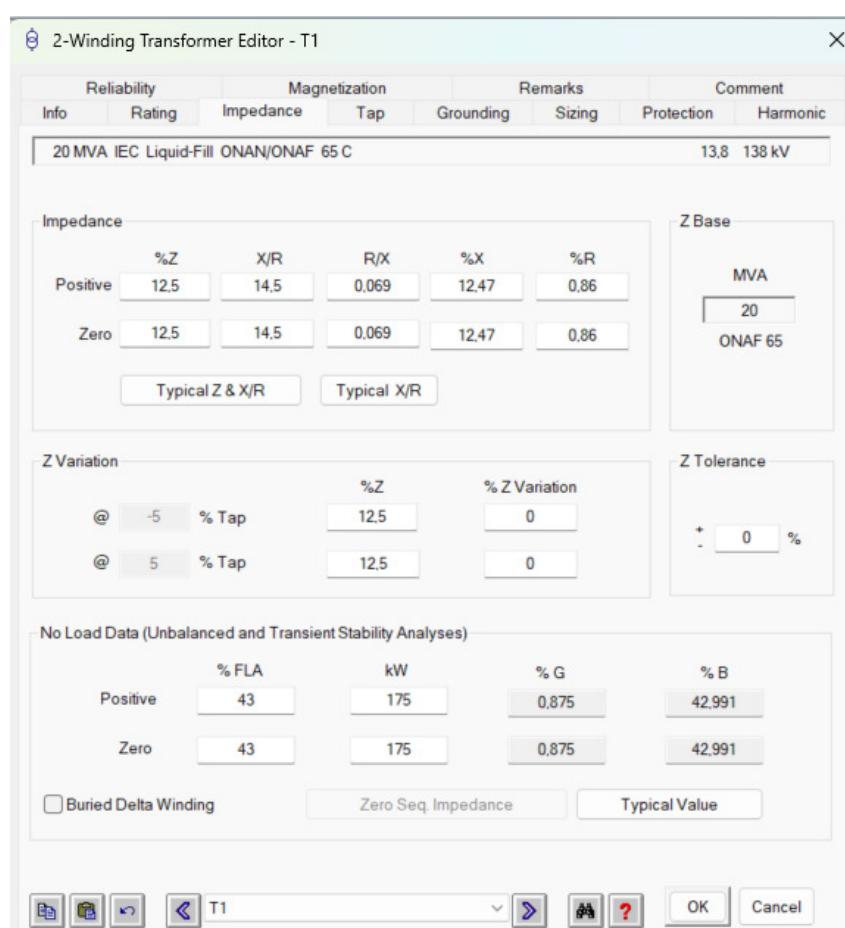
### 3.4.2.3 Página de Impedância (Impedance)

A aba *Impedance* (Figura 69) caracteriza o comportamento do transformador em estudos de regime permanente e curto-circuito. Para este trabalho, os dados foram inseridos com base na temperatura de referência de 85 °C, representando o comportamento do transformador em sua condição "quente". O modelo é composto por três conjuntos de dados principais:

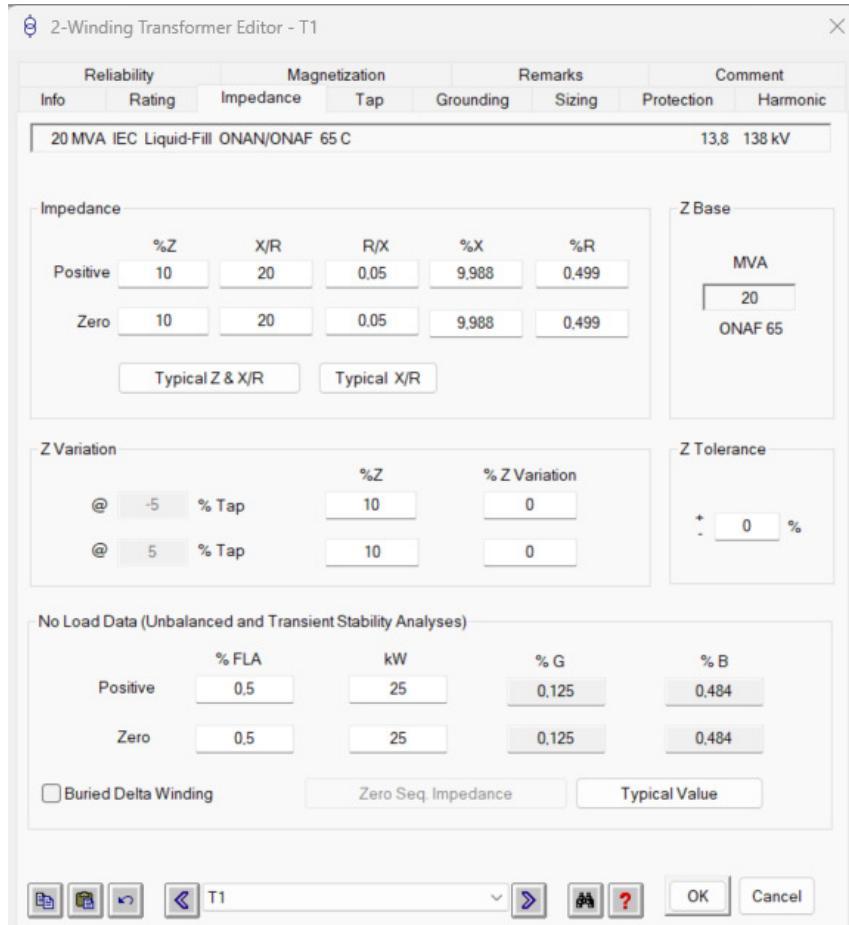
- **Impedância de Sequência Positiva ( $Z_1$ ):** Representa o comportamento do transformador sob cargas balanceadas. Seus componentes, a resistência (%R) e a reatância (%X), são calculados a partir das perdas em carga e do valor de impedância percentual (%Z) fornecidos na folha de dados. Este parâmetro é fundamental para os cálculos de fluxo de potência e faltas trifásicas.

- **Impedância de Sequência Zero ( $Z_0$ ):** Parâmetro crítico para a simulação de faltas envolvendo a terra. Seu valor é altamente dependente da construção do núcleo (ex: Core, 3 Limb) e do grupo de ligação (ex: Dyn1). A correta inserção de  $Z_0$ , seja a partir do relatório de ensaios ou de valores típicos estimados pelo software, é vital para a precisão dos estudos de proteção.
- **Dados de Vazio (No Load Data):** Esta seção modela o ramo de magnetização do núcleo através das perdas a vazio (kW) e da corrente de excitação (%FLA). Estes dados são essenciais para o cálculo preciso de perdas no sistema em estudos de fluxo de potência desbalanceado e para análises de transitórios eletromagnéticos.

Quando dados de ensaios não estão disponíveis, o ETAP oferece a ferramenta **Typical Data** (Figura 70) para estimar os parâmetros com base em uma biblioteca interna, uma funcionalidade valiosa para estudos preliminares.



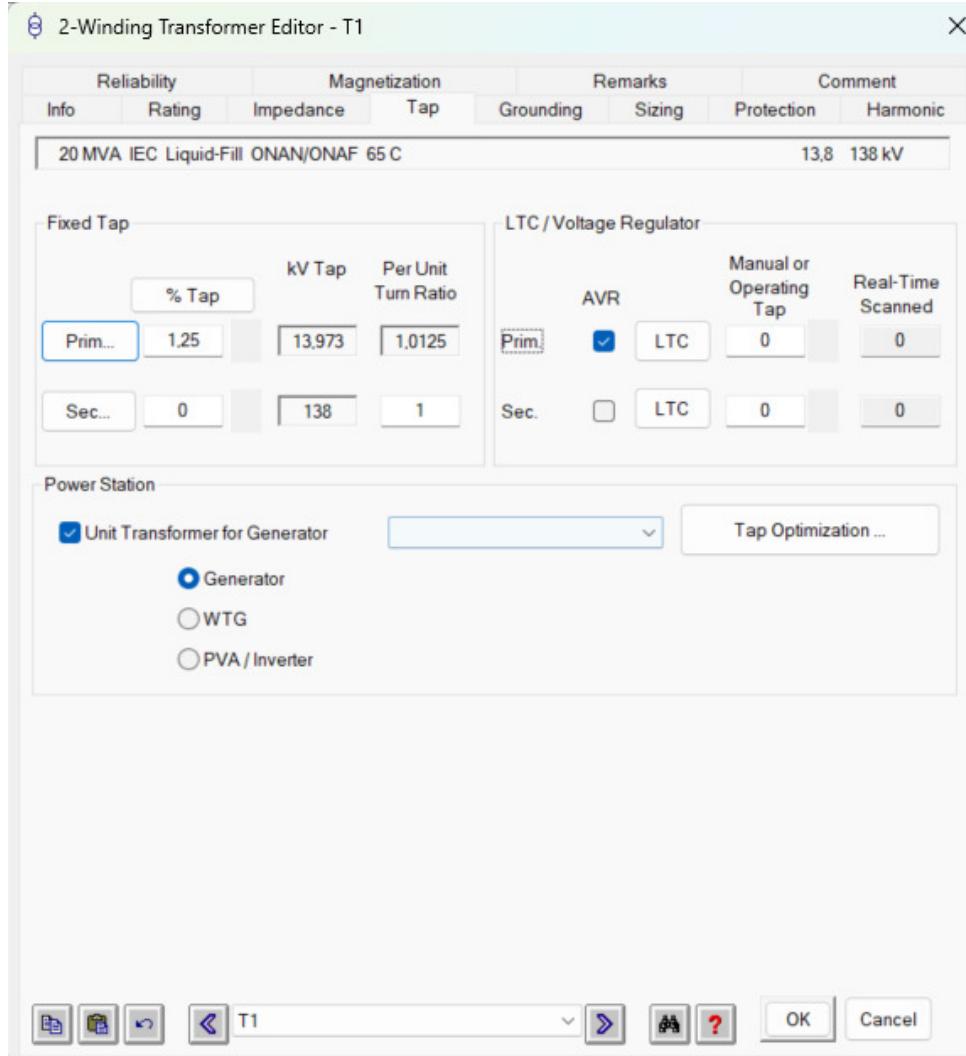
**Figura 69 – Interface da página *Impedance* com os dados de placa do transformador.**  
Fonte: O autor.



**Figura 70 – Interface da página *Impedance* com parâmetros estimados via *Typical Data*.**  
Fonte: O autor.

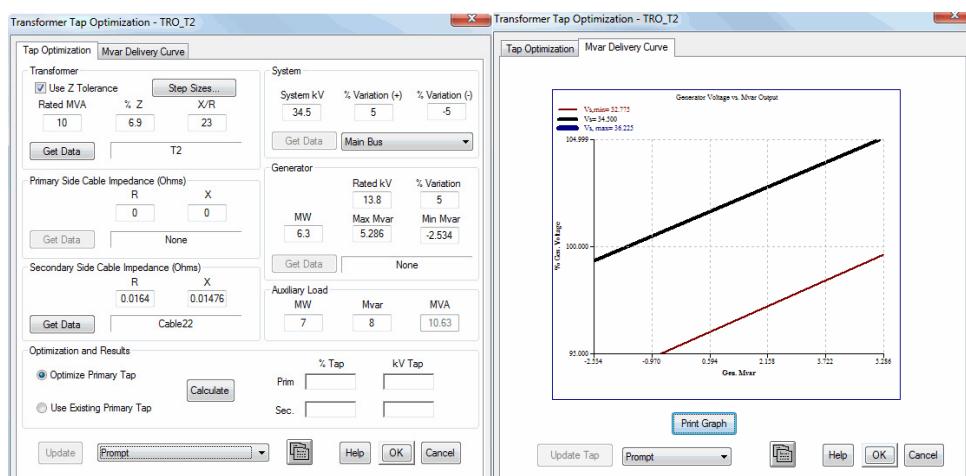
#### 3.4.2.4 Página do Comutador de Taps (TAP)

A aba *TAP* (Figura 71) é dedicada à modelagem dos métodos de ajuste da relação de tensão. Ela permite configurar um comutador fixo (**DETC**, ajustado com o equipamento desenergizado) ou um comutador sob carga (**LTC**), que regula a tensão de forma automática e dinâmica (**AVR**). Para transformadores de usinas (GSU), a ferramenta de **Otimização de Tap** (Figura 72) calcula a posição ideal que minimiza a necessidade de produção ou absorção de reativos pelo gerador, preservando sua reserva para a estabilidade da rede.



**Figura 71 – Interface de configuração do comutador de taps do transformador ETAP**

Fonte: O autor.

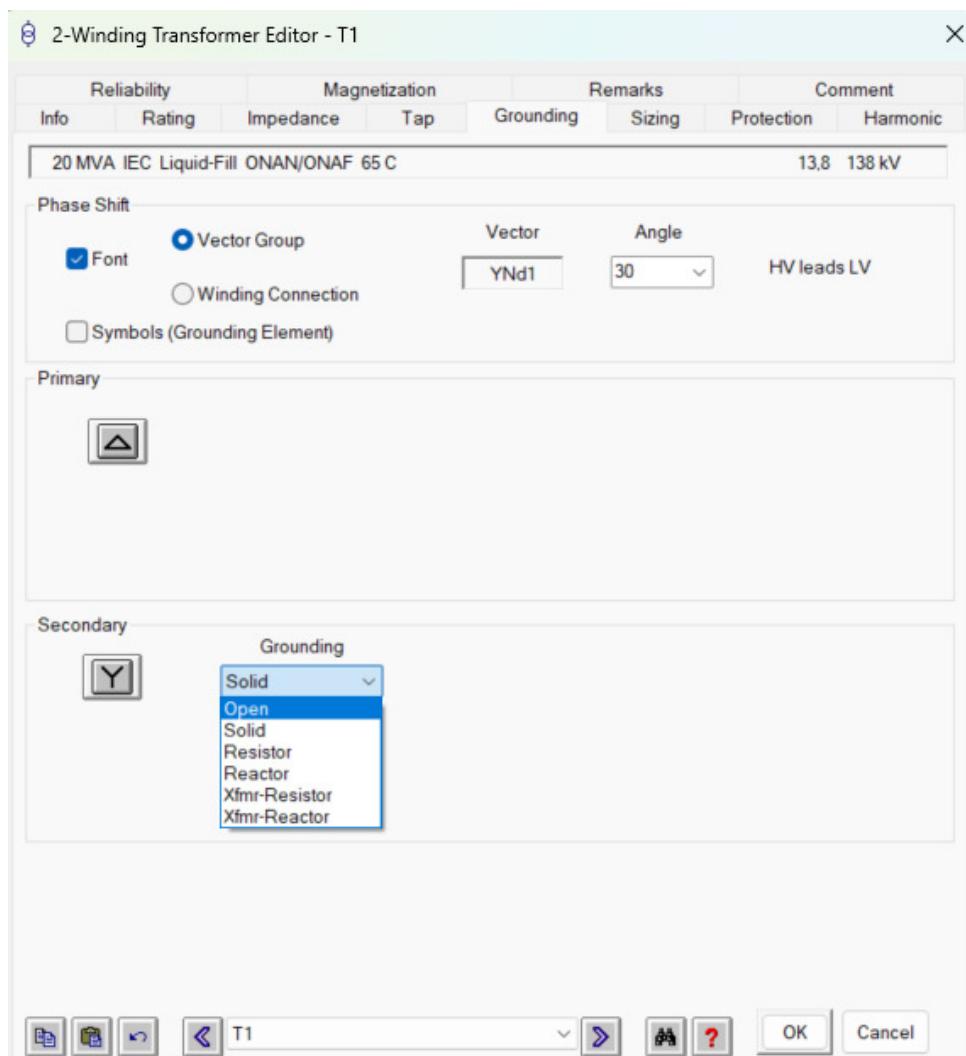


**Figura 72 – Interface de configuração ferramenta Otimização do TAP do ETAP**

Fonte: O autor.

### 3.4.2.5 Página de Aterramento (Grounding)

A aba *Grounding* (Figura 73) define a topologia de conexões dos enrolamentos (Delta ou Estrela) e o método de aterramento do neutro para as ligações em Estrela. A escolha entre aterramento **sólido**, por **impedância** ou **não aterrado** é uma decisão de projeto crítica que influencia diretamente a magnitude da corrente de curto-círcuito monofásica à terra e, com base nessas escolhas, o software determina o grupo de ligação do transformador (ex: **Dyn1**).



**Figura 73 – Interface de configuração do aterramento do transformador no ETAP.**

**Fonte:** O autor.

### 3.4.2.5.1 Resumo da Aba de Proteção do Transformador

A aba **Protection** do editor de transformadores no ETAP é a interface dedicada à coordenação de proteções, traduzindo os dados elétricos do equipamento em ferramentas visuais para o engenheiro. Nela, o software **calcula a contribuição de curto-círcuito** do transformador, **plota a curva de dano térmico** (baseada na norma IEEE C57.109) e permite a modelagem

da **corrente de inrush**. Esses três elementos definem o "corredor seguro" para o ajuste dos relés: a proteção deve ser rápida o suficiente para atuar **abaixo da curva de dano**, garantindo a integridade do transformador, mas lenta o suficiente para ficar **acima do ponto de inrush**, evitando disparos indesejados durante a energização. Dessa forma, a aba consolida as informações essenciais para uma seletividade segura e confiável.

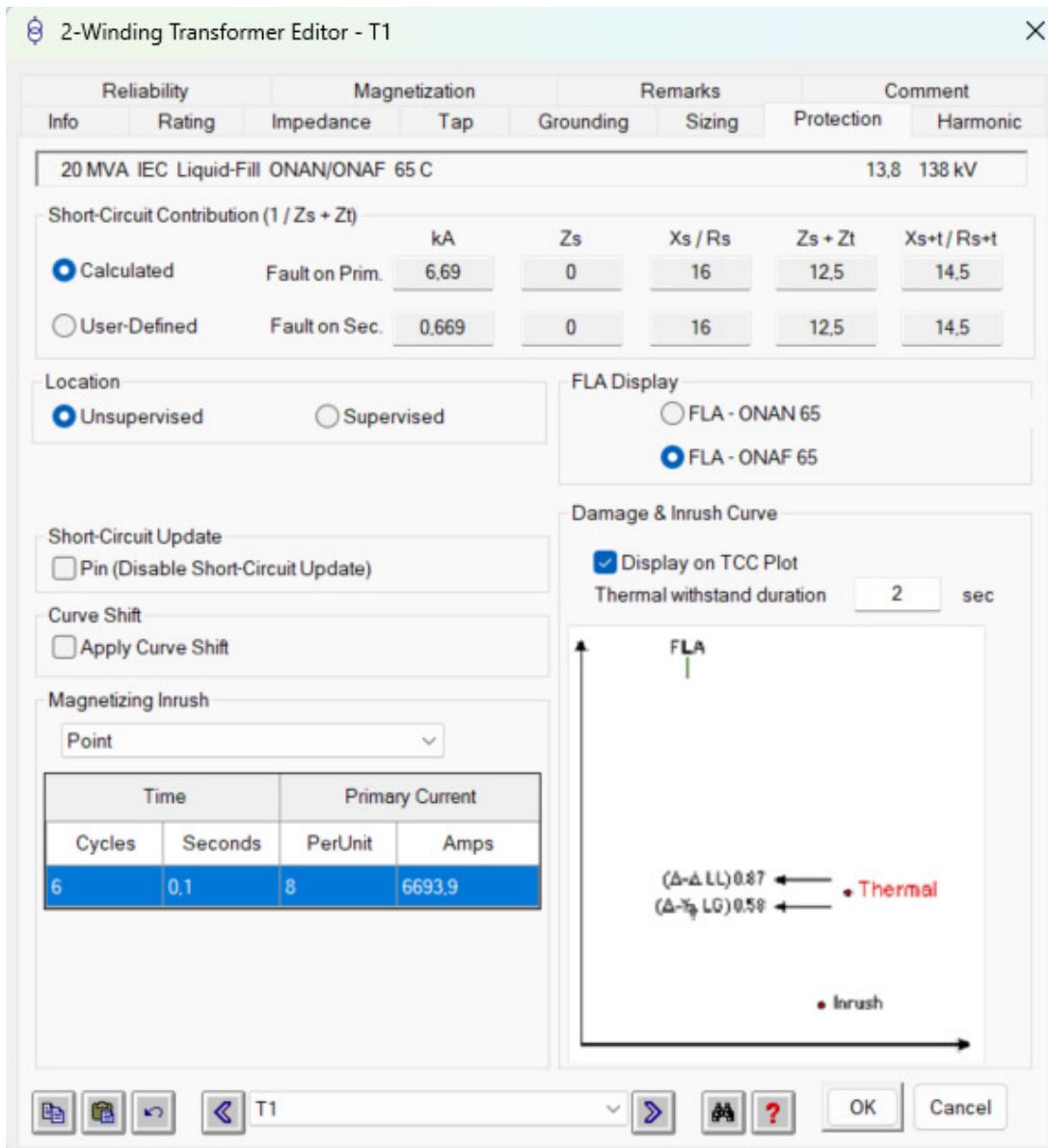


Figura 74 – Interface com parâmetros de proteção calculados e definidos pelo usuário.

Fonte: O autor.

### 3.4.3 Modelagem do Transformador no PTW

A modelagem de transformadores no software PTW (*Power-Tool for Windows*) é realizada através de elementos dedicados, disponíveis em sua interface gráfica. A biblioteca de componentes inclui modelos para transformadores de dois e três enrolamentos. Em conformi-

dade com o estudo de caso, este trabalho focará na parametrização do **transformador de dois enrolamentos**. A Figura 75 ilustra a localização deste elemento na barra de ferramentas do software.



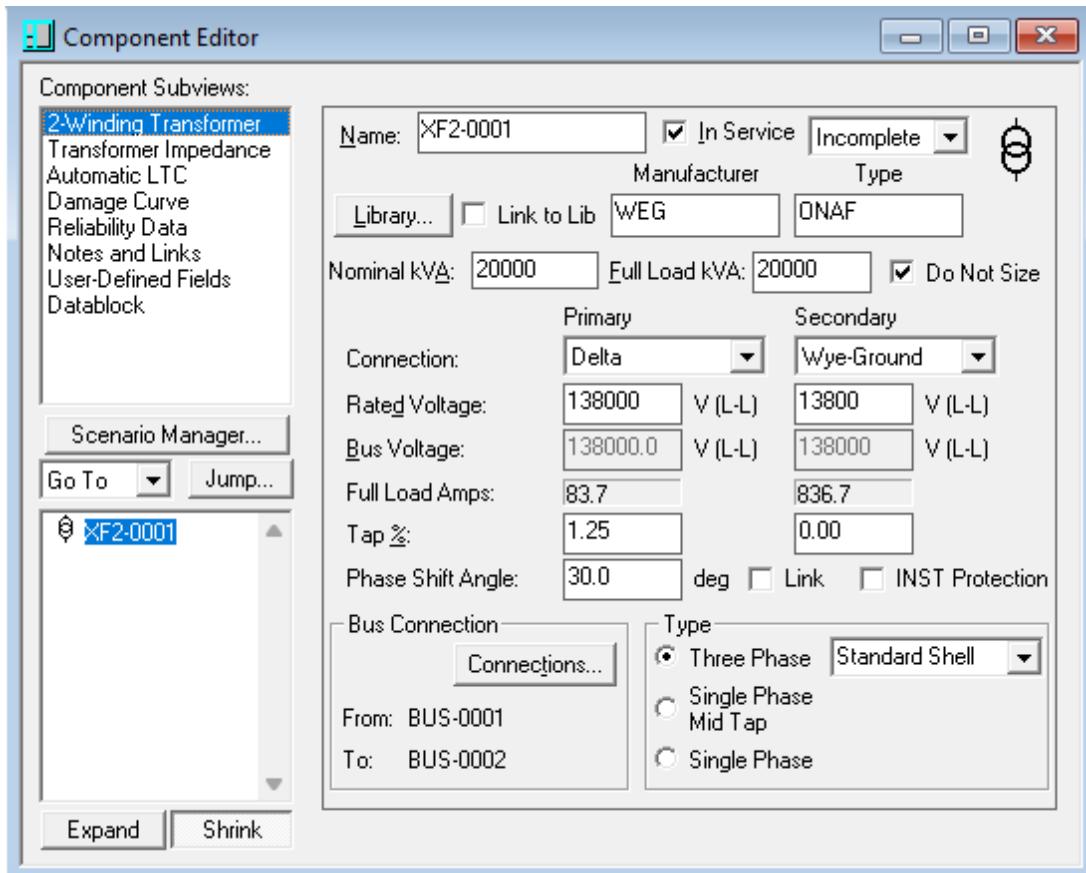
**Figura 75 – Localização do elemento de transformador de dois enrolamentos no PTW.**

**Fonte:** O autor.

A configuração do equipamento é realizada através de um editor com múltiplas abas (*subviews*), detalhadas a seguir.

#### 3.4.3.1 Dados Gerais e Modo de Operação (Subview: 2-Winding Transformer)

A interface principal de configuração (Figura 76) centraliza os parâmetros operacionais essenciais. Nela, são definidos pontos fundamentais como as **Conexões (Connection)** dos enrolamentos (neste caso, Delta-Estrela Aterrado), que estabelecem a defasagem angular e o comportamento em faltas à terra. A interface também permite a configuração do **Comutador de Taps (TAP)** para regulação de tensão e do **Tipo Físico (Type)** do núcleo, que influencia o cálculo da impedância de sequência zero ( $Z_0$ ).



**Figura 76 – Interface de configuração básica do transformador no PTW.**

**Fonte:** O autor.

### 3.4.3.2 Parâmetros Elétricos (Subview: Transformer Impedance)

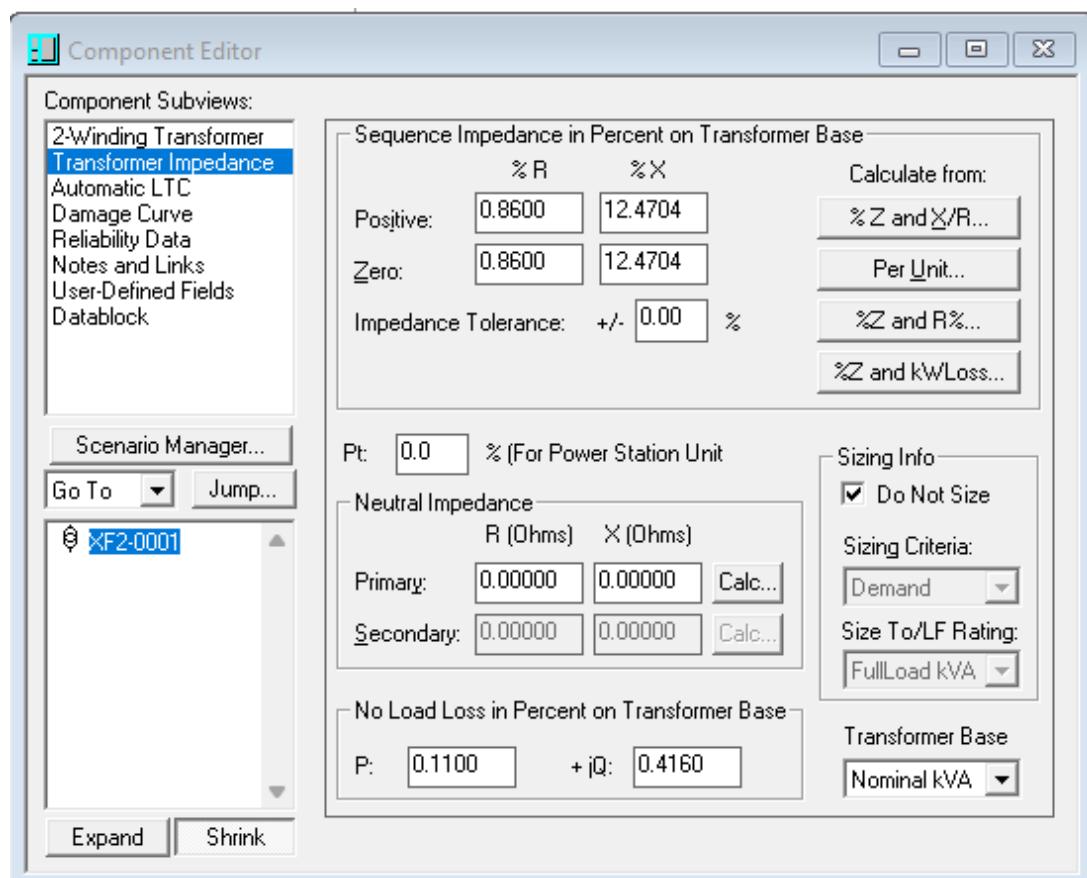
A aba *Transformer Impedance* (Figura 77) é a interface central para a definição dos parâmetros elétricos do equipamento.

#### *3.4.3.2.1 Impedâncias de Sequência e Calculadoras*

Nesta seção, o usuário insere os valores de impedância de sequência positiva e zero (%R e %X). Uma ferramenta notável é a calculadora "**%Z and kW Loss**", utilizada neste trabalho, que computa automaticamente %R e %X a partir da impedância total e das perdas em carga, dados comuns em folhas de dados. A interface também inclui campos para a **Impedância de Neutro** (o qual o software disponibiliza ao usuário para encontrar a impedância em a partir da corrente desejada (Figura 78)) e parâmetros específicos da norma **IEC 60909**, como o fator '**Pt**'.

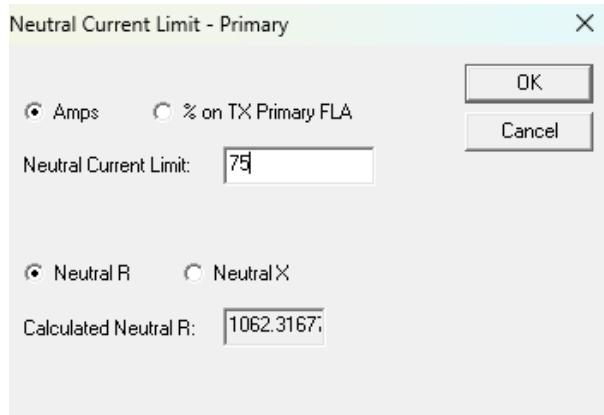
### 3.4.3.2.2 Impedâncias de Sequência e Calculadoras

Nesta seção, o usuário insere os valores de **impedância de sequência positiva e zero** (%R e %X). Para facilitar a entrada de dados, o PTW oferece ferramentas de conversão, como a calculadora "**%Z and kW Loss**", utilizada neste trabalho, que computa automaticamente %R e %X a partir da impedância total e das perdas em carga. A interface também inclui campos para a **Impedância de Neutro**; para este parâmetro, o software disponibiliza uma calculadora auxiliar (Figura 78) que permite determinar o valor da impedância necessária para limitar a corrente de falta à terra a um valor desejado. Por fim, a seção contém parâmetros específicos da norma **IEC 60909**, como o fator Pt.



**Figura 77 – Interface de configuração de impedâncias e perdas do transformador no PTW.**

**Fonte:** O autor.



**Figura 78 – Interface com a calculadora de impedância do PTW**

**Fonte:** O autor.

### 3.4.3.3 Resumo da Funcionalidade Automatic LTC

A funcionalidade **Automatic LTC** no PTW simula o comportamento de Comutadores de Derivações Sob Carga para regular a tensão em estudos de fluxo de carga. Sua operação é definida por três pilares principais. Primeiro, os **Modos de Operação**, que incluem Fixed Tap (LTC desativado), LTC Regular (operação independente) e LTC Master/Slave (para o controle sincronizado de transformadores em paralelo). Segundo, a **Lógica de Controle**, onde o LTC monitora a tensão em um Measurement Bus específico, tentando mantê-la dentro de uma faixa definida pelo Set Point Voltage e uma Tolerance (banda morta). Por fim, a atuação é restringida pelos **Limites Físicos** do equipamento, como a posição de Min/Max Tap e o Step Size. Durante o cálculo do fluxo de carga, o software ajusta iterativamente o tap até que a tensão no ponto de medição esteja dentro da faixa de tolerância ou um dos limites físicos seja atingido.

### 3.4.3.4 Curva de Dano e Inrush (Subview: Damage Curve)

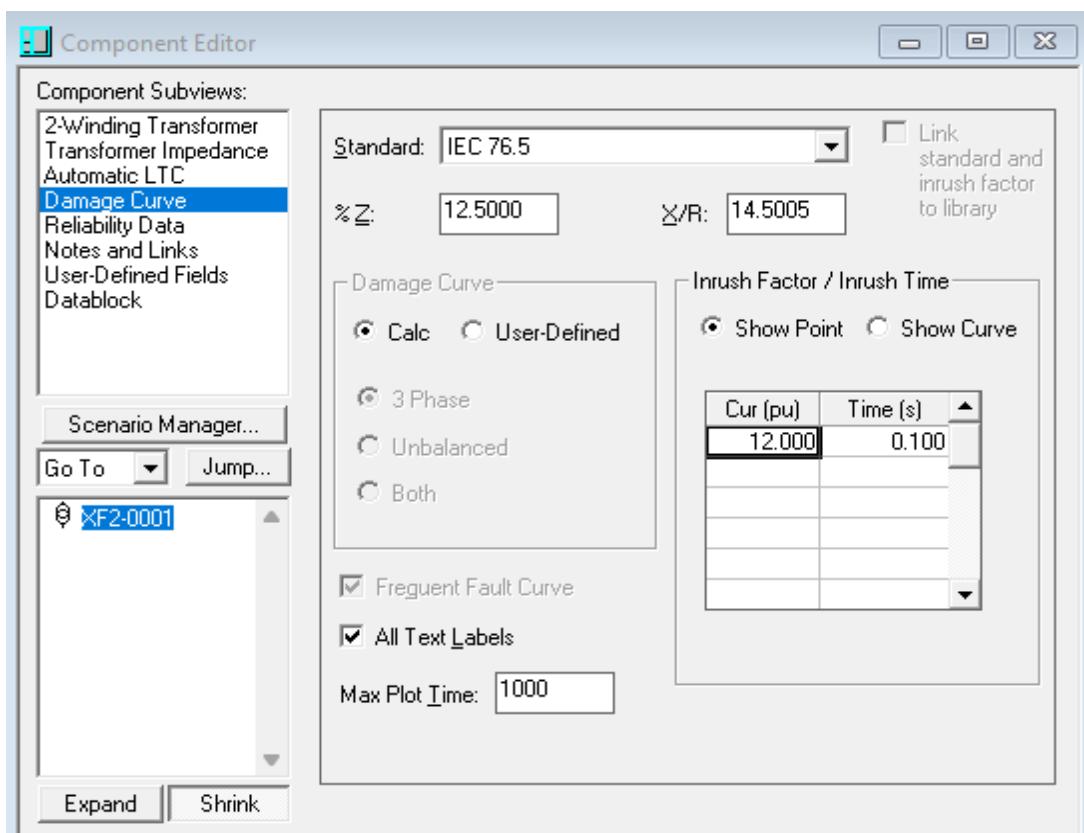
A sub-vista *Damage Curve* (Figura 79) é essencial para o estudo de proteção, pois define as fronteiras de atuação para os relés.

#### *3.4.3.4.1 Definição da Curva de Dano*

A curva de dano representa o limite térmico e mecânico do transformador. O PTW permite gerá-la automaticamente com base em normas como a **ANSI C57.109** ou **IEC 60076-5**. A interface modela o deslocamento da curva para faltas desequilibradas em conexões como Delta-Estrela e plota a curva de dano mecânico para transformadores de grande porte, que é frequentemente mais restritiva.

#### 3.4.3.4.2 Característica de Corrente de Inrush

Esta seção modela a corrente de energização, um fenômeno transitório que não constitui uma falta. O *inrush* pode ser representado como um **ponto** único no gráfico TCC ou como uma **curva** de decaimento. A proteção deve ser ajustada para ser mais lenta que esta característica, evitando atuações indevidas. Ao configurar corretamente a curva de dano (limite máximo) e a característica de inrush (limite mínimo), define-se a "zona de trabalho" segura para o ajuste do relé.



**Figura 79 – Interface de configuração da Curva de Dano e Corrente de Inrush no PTW.**

**Fonte:** O autor.

#### 3.4.4 Análise Crítica e Quadro Comparativo dos Tranformadores

A análise detalhada da modelagem de transformadores revela filosofias e pontos fortes distintos entre as três plataformas de software. Enquanto todos são capazes de representar o equipamento com alta fidelidade, a abordagem, o fluxo de trabalho e as ferramentas auxiliares variam significativamente, direcionando cada software para diferentes tipos de aplicação. A Tabela 6 consolida as principais características observadas.

**Tabela 6 – Quadro Comparativo da Modelagem de Transformadores nos Softwares.**

<b>Funcionalidade</b>	<b>DIGSILENT PowerFactory</b>	<b>ETAP</b>	<b>PTW (SKM)</b>
<b>Filosofia de Modelagem</b>	Estrutura de dois níveis: <b>Tipo</b> (TypTr2) para dados técnicos reutilizáveis e <b>Elemento</b> (ElmTr2) para a instância operacional.	Objeto único com múltiplas <b>páginas</b> de configuração (Info, Rating, Impedance, etc.).	Objeto único com múltiplas <b>sub-vistas</b> , separando dados gerais, impedâncias e curvas de proteção.
<b>Entrada de Dados de Impedância</b>	Flexível, com conversão automática entre diferentes formatos (ex: %Z ou perdas) no TypTr2.	Flexível, com ferramenta " <b>Typical Data</b> " para estimar parâmetros e conversão a partir de perdas.	Prática, com calculadora " <b>%Z and kW Loss</b> " para preencher %R e %X. Entrada dedicada para parâmetros IEC.
<b>Modelagem do Comutador (LTC)</b>	Altamente detalhada no TypTr2, permitindo modelos de impedância dependente do tap e transformadores defasadores (PSTs).	Completa, com distinção clara entre DETC e LTC (AVR), e uma ferramenta de <b>otimização de tap</b> para usinas.	Integrada à interface principal, permitindo a configuração dos ajustes de tap para regulação de tensão, podendo criar lógicas de controle.
<b>Dados para Proteção</b>	Curva de dano e parâmetros de inrush definidos no TypTr2. Opções visuais de coordenação no ElmTr2.	Página dedicada que calcula a contribuição de curto e permite definir a curva de dano (IEEE C57.109) e o ponto de inrush.	Sub-vista dedicada ( <i>Damage Curve</i> ) com geração de curvas por normas (ANSI/IEC), modelagem de dano mecânico e inrush.
<b>Diferencial Notável</b>	A estrutura Tipo/Elemento, que permite uma gestão e padronização de ativos em larga escala, ideal para grandes concessionárias e consultorias.	A abordagem "tudo-em-um" com ferramentas práticas como "Typical Data" e "Categorias de Geração", focada na produtividade para projetos industriais.	A clareza na separação dos dados para normas específicas (aba IEC) e a transparência na modelagem da curva de dano e inrush.

#### 3.4.4.0.1 Conclusão da Análise

A análise comparativa, sintetizada na Tabela 6, evidencia que os três softwares oferecem ferramentas robustas e de alta fidelidade para a modelagem de transformadores de potência. O DIgSILENT PowerFactory se destaca por sua estrutura de dados orientada a objetos, que confere enorme flexibilidade e organização para a gestão de grandes sistemas. O ETAP, por sua vez, distingue-se pela sua praticidade e riqueza de ferramentas auxiliares, como a estimativa por dados típicos e a otimização de tap, que agilizam o trabalho do engenheiro de projetos. Finalmente, o PTW apresenta uma abordagem muito estruturada e transparente, com interfaces dedicadas para cada aspecto da modelagem, desde os parâmetros para normas IEC até a detalhada configuração das curvas de proteção, tornando-o uma ferramenta muito poderosa para estudos de seletividade.

### 3.5 Motores

O motor elétrico é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica por meio da interação eletromagnética, sendo a principal força motriz em aplicações industriais e comerciais (Chapman 2013). Os motores de corrente alternada são divididos em duas categorias principais: o **motor de indução (ou assíncrono)**, que é o mais utilizado devido à sua robustez e custo, e o **motor síncrono**, empregado em aplicações de alta potência e para o controle do fator de potência (Umans 2014). A importância dos motores para o SEP é dupla: eles não apenas constituem a maior parcela da carga total a ser suprida, mas também influenciamativamente a estabilidade da rede. Fenômenos como a alta corrente na partida de motores de grande porte e sua contribuição para as correntes de curto-circuito são fatores críticos que exigem uma modelagem precisa para garantir a operação segura e confiável do sistema (Grainger e Stevenson 1994).

#### 3.5.0.1 Definição do Estudo de Caso Modelagem

Para conferir maior veracidade e aplicação prática à análise comparativa, a modelagem do motor de indução neste trabalho será baseada em um estudo de caso real. Foram utilizados os dados técnicos de um motor de média tensão da fabricante WEG, cujas especificações foram extraídas de uma folha de dados, da folha de dados oficial da linha HGF (WEG 2023). Para os propósitos da análise, adota-se como premissa que o motor possui seus enrolamentos do estator conectados em **estrela com neutro solidamente aterrado**, uma configuração comum em sistemas industriais para facilitar a detecção de faltas à terra.

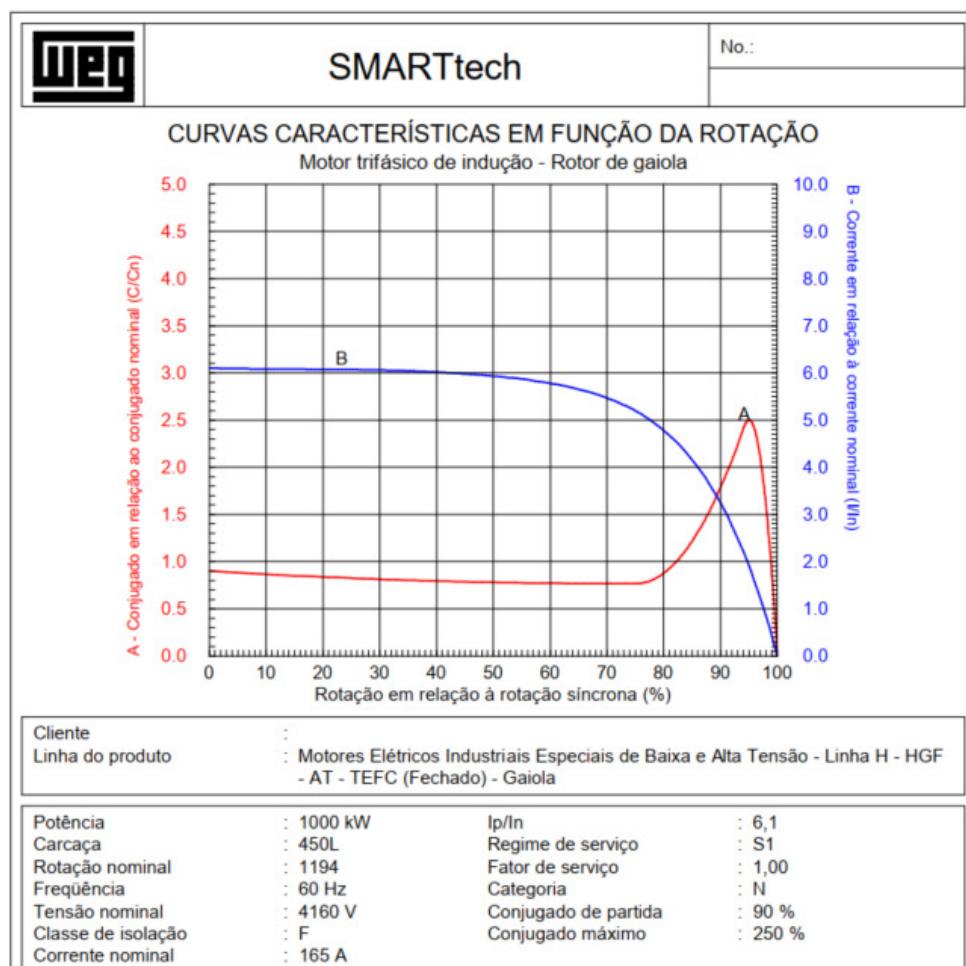
**Tabela 7 – Dados Técnicos Consolidados do Motor de Indução WEG HGF-AT-TEFC.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	
<b>Dados de Placa</b>		
Potência Nominal	1000 kW	
Tensão Nominal	4160 V	
Corrente Nominal	165 A	
Frequência	60 Hz	
Número de Polos	6	
Rotação Nominal	1194 rpm	
Escorregamento Nominal	0,50 %	
<b>Dados de Partida e Conjugado</b>		
Corrente de Partida	1010 A	
Relação $I_p/I_n$	6,1	
Conjugado Nominal	8002 Nm	
Conjugado de Partida	90 %	
Conjugado Máximo	250 %	
<b>Dados Construtivos e Térmicos</b>		
Carcaça	450L	
Categoria	N	
Classe de Isolação	F	
Fator de Serviço	1,00	
Momento de Inércia	33,97 kg·m <sup>2</sup>	
<b>Dados de Desempenho em Função do Carregamento</b>		
<b>Fator de Carga (%)</b>	<b>Fator de Potência</b>	<b>Rendimento (%)</b>
100	0,87	96,8
75	0,84	96,7
50	0,76	96,3

Fonte: (WEG 2023)

Além dos parâmetros nominais apresentados na Tabela 7, uma análise completa da modelagem de um motor de indução deve considerar suas curvas de desempenho. Estas curvas, que descrevem a relação entre torque, corrente, fator de potência e rotação, são fundamentais para a execução de estudos dinâmicos, como a análise de partida de motores.

As Figuras 80 e 81 apresentam as curvas características do motor WEG utilizado neste estudo, extraídas de sua folha de dados. A capacidade de cada plataforma de software de importar, digitalizar ou modelar estas curvas é um importante critério de comparação a ser avaliado.



**Figura 80 – Curvas características do motor WEG HGF 450L em função da rotação.**

**Fonte:** (WEG 2023).

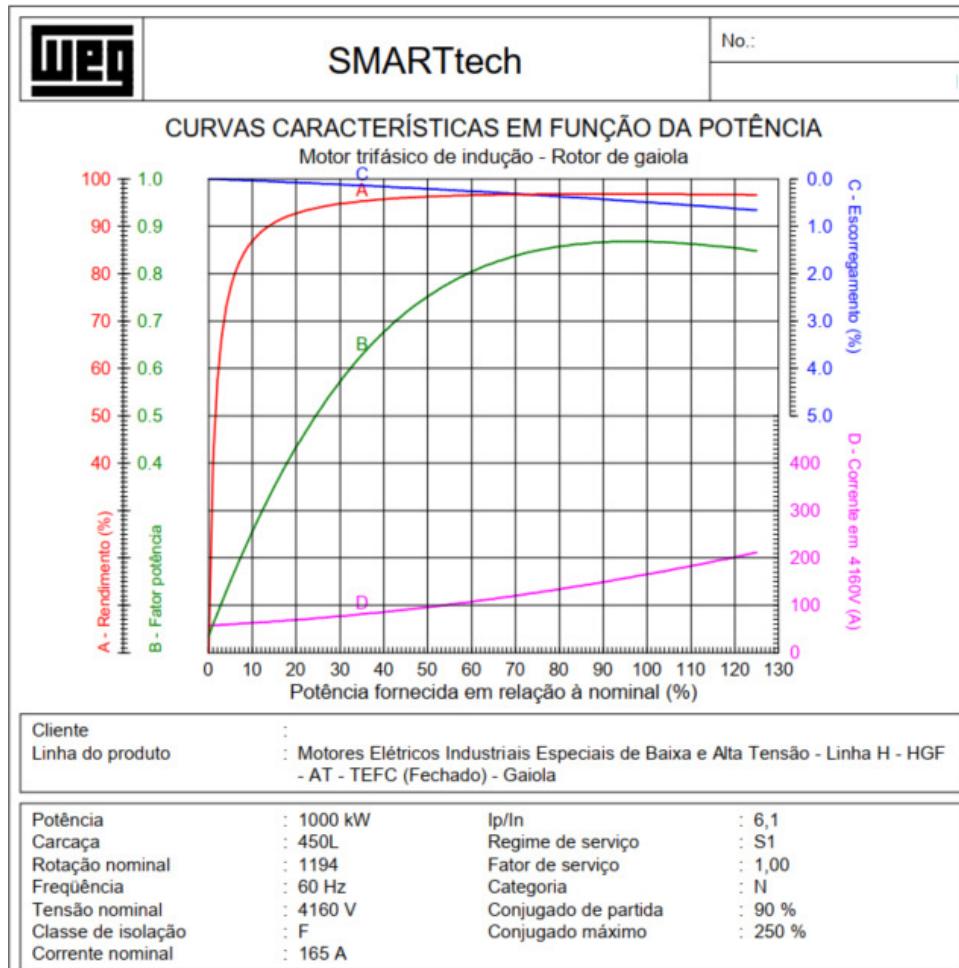
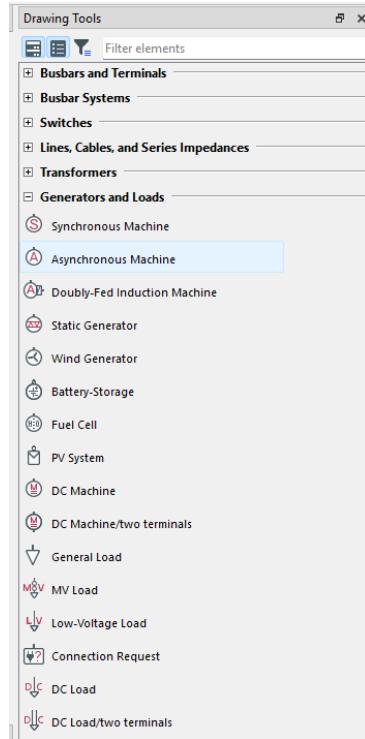


Figura 81 – Curvas características do motor WEG HGF 450L em função da potência.

Fonte: (WEG 2023).

### 3.5.1 Modelagem do Motor de Indução no DIgSILENT PowerFactory

Para a representação de cargas rotativas, os motores de indução de gaiola de esquilo são modelados no PowerFactory através do elemento **Máquina Assíncrona (Asynchronous Machine)**, identificado como ElmAsm. A Figura 82 ilustra a localização deste componente na paleta de ferramentas de desenho. A modelagem segue a filosofia de dois níveis da plataforma, separando os dados técnicos (**Tipo**) da sua instância no diagrama (**Elemento**).



**Figura 82 – Localização do elemento Asynchronous Machine (ElmAsm).**

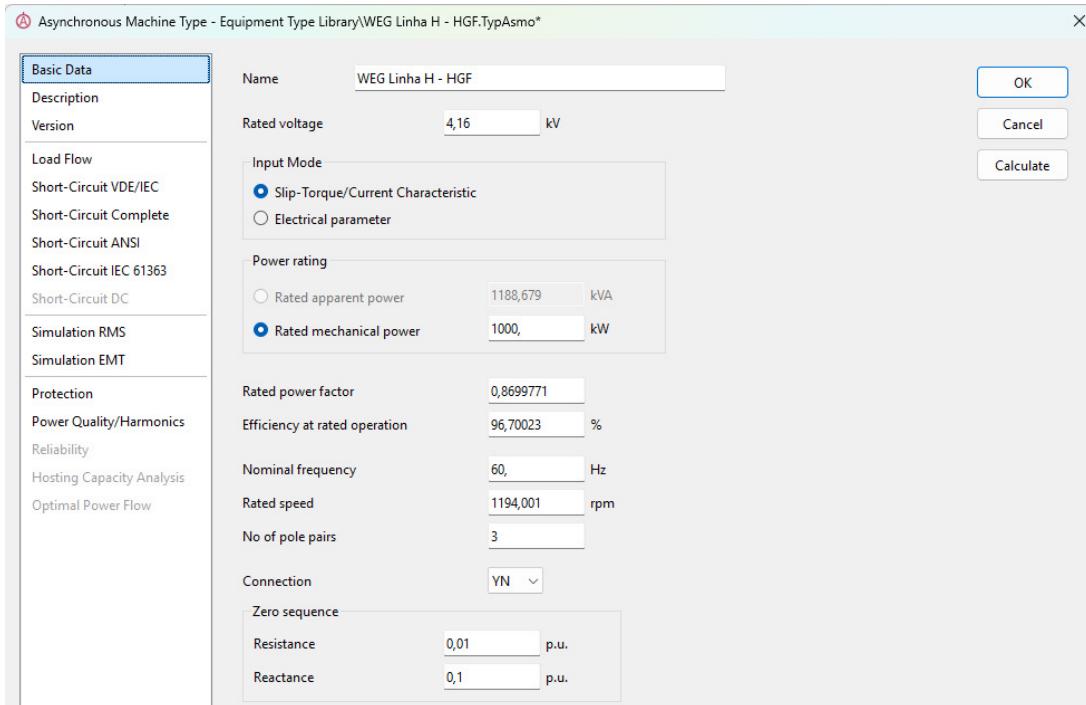
**Fonte:** O autor.

### 3.5.1.1 Configuração do Tipo de Máquina Assíncrona (TypAsm)

O TypAsm armazena todas as características nominais e de performance da máquina.

#### *3.5.1.1.1 Aba Basic Data*

Nesta interface (Figura 83), a decisão fundamental é o **Modo de Entrada (Input Mode)**. A abordagem **Slip-Torque/Current Characteristic** é baseada em dados de placa (potência, rendimento, etc.), a partir dos quais o software estima os parâmetros do circuito equivalente. Já a abordagem **Electrical parameter** permite a inserção direta destes parâmetros (resistências e reatâncias), sendo o método de maior precisão. Para este trabalho, adotou-se o primeiro método, mais comum na prática de projetos. As equações que fundamentam o processo de estimativa são detalhadas no manual do usuário (DlgsILENT GmbH 2024).

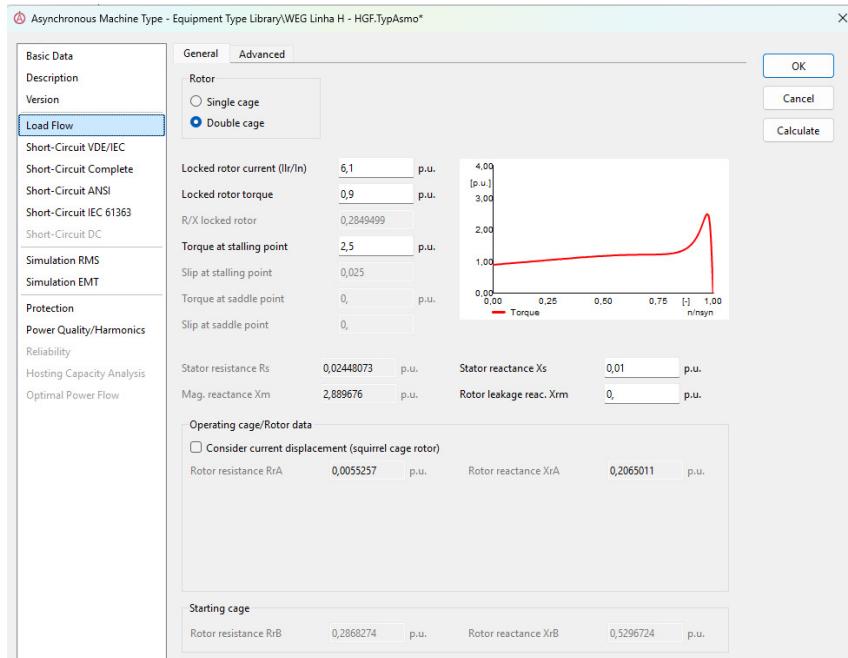


**Figura 83 – Interface *Basic Data* do TypAsm com o modo de entrada por dados de placa selecionado.**

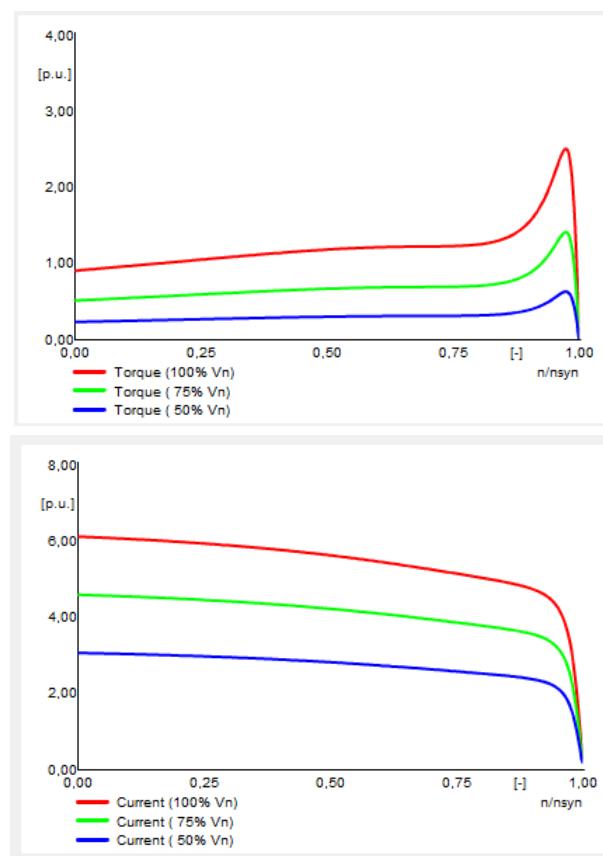
**Fonte:** O autor.

### 3.5.1.1.2 Aba Load Flow

A estimativa dos parâmetros do circuito equivalente é realizada nesta aba (Figura 84). Após a inserção dos dados nominais, o software solicita os dados de partida (corrente, conjugado de partida e conjugado máximo). Com base neste conjunto de informações, o algoritmo do PowerFactory calcula os parâmetros do circuito e gera a curva Torque vs. Velocidade da máquina, que pode ser visualizada e exportada na aba Advanced (Figura 85).



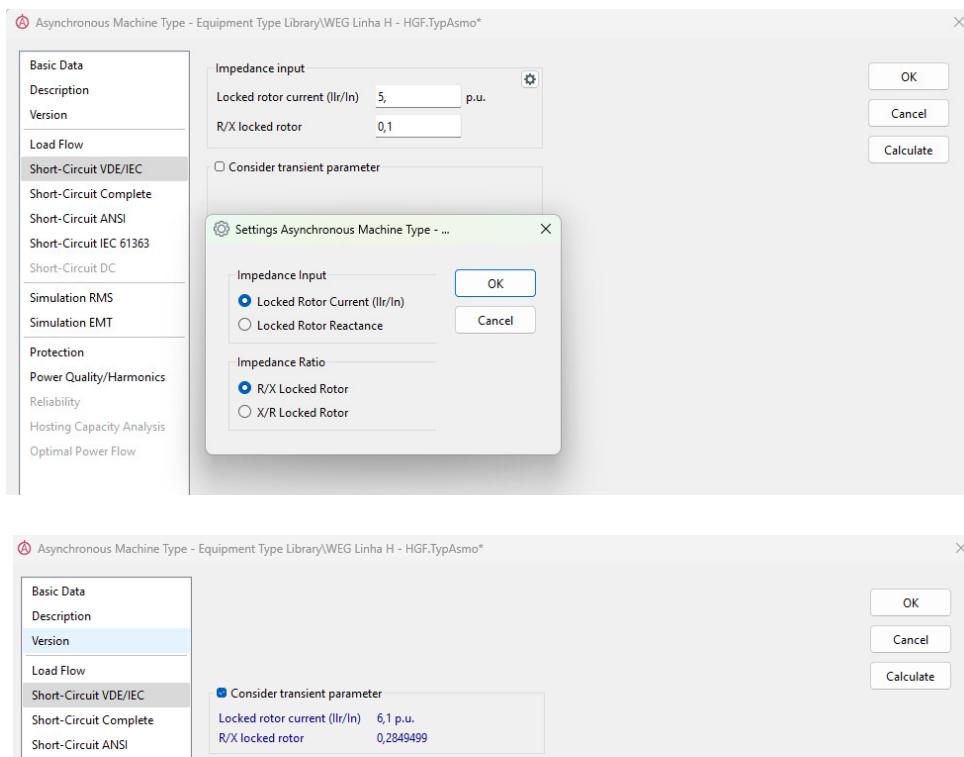
**Figura 84 – Interface de cálculo de parâmetros na aba *Load Flow* do TypAsm.**  
Fonte: O autor.



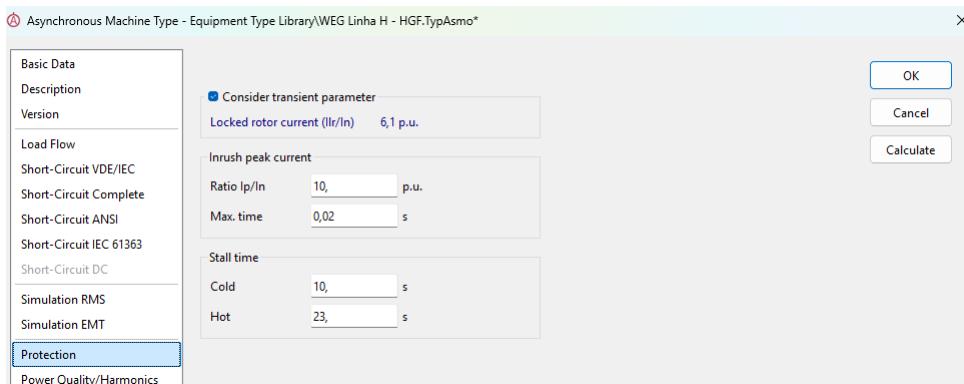
**Figura 85 – Visualização das curvas de torque e corrente estimadas na aba *Advanced*.**  
Fonte: O autor.

### 3.5.1.1.3 Abas Short-Circuit e Protection

Para a análise de curto-circuito (Figura 86), o motor é representado por sua impedância de rotor bloqueado ( $Z_{lr}$ ), definida pela sua corrente de partida ( $I_{lr}/I_n$ ) e pela relação R/X. O software utiliza por padrão os valores estimados na aba *Load Flow*, garantindo a consistência do modelo. Na aba *Protection* (Figura 87), são definidos os limites térmicos da máquina através dos tempos de rotor bloqueado a quente e a frio (*Stall time*), que estabelecem a curva de dano térmico, e os parâmetros da corrente de inrush, que definem uma zona de não atuação para a proteção.



**Figura 86 – Interface de configuração de parâmetros para estudos de curto-circuito no TypAsm.**  
**Fonte:** O autor.



**Figura 87 – Interface de configuração de parâmetros para estudos de proteção no TypAsm.**  
**Fonte:** O autor.

### 3.5.1.2 Configuração do Elemento no Diagrama (ElmAsm)

A configuração do ElmAsm foca-se no seu estado operacional. Na aba *Load Flow*, define-se o ‘**Bus type**’ como ‘**AS**’, no qual o usuário especifica a potência ativa consumida e o software calcula a reativa com base no circuito equivalente. Na aba *Short-Circuit*, a opção ‘**Static converter-fed drive**’ é crucial, devendo ser marcada caso o motor seja acionado por inversor, pois isso altera fundamentalmente seu modelo de contribuição de falta. Por fim, a aba *Protection* gerencia a exibição das curvas de dano, inrush e tempo de partida no gráfico de coordenação TCC.

### 3.5.2 Modelagem do Motor de Indução no ETAP

A modelagem de motores de indução no ETAP é realizada através do elemento ***Induction Machine***, disponível na barra de ferramentas (Figura 88). A correta parametrização deste componente é crítica, pois ele atua como carga em regime permanente, como fonte de corrente em curtos-circuitos e demanda elevada corrente na partida. O escopo deste trabalho foca no motor de indução.



**Figura 88 – Localização do elemento *Induction Machine* na barra de ferramentas do ETAP.**

**Fonte:** O autor.

A configuração do motor é realizada em um editor com múltiplas abas (“Pages”), detalhadas a seguir.

### 3.5.2.1 Páginas de Configuração Geral (*Info* e *Nameplate*)

As abas iniciais centralizam os dados de identidade, operação e nominais do motor.

### 3.5.2.1.1 Aba Info

(Figura 89) Nesta seção, define-se o estado operacional do motor para diferentes cenários de estudo (*Condition* e *Configuration*). Ferramentas como o *Demand Factor* e o campo *Quantity* permitem modelar, respectivamente, cargas parciais e grupos de motores idênticos com um único elemento. Também se define a prioridade da carga para estudos de corte de carga (*Load Shedding*).

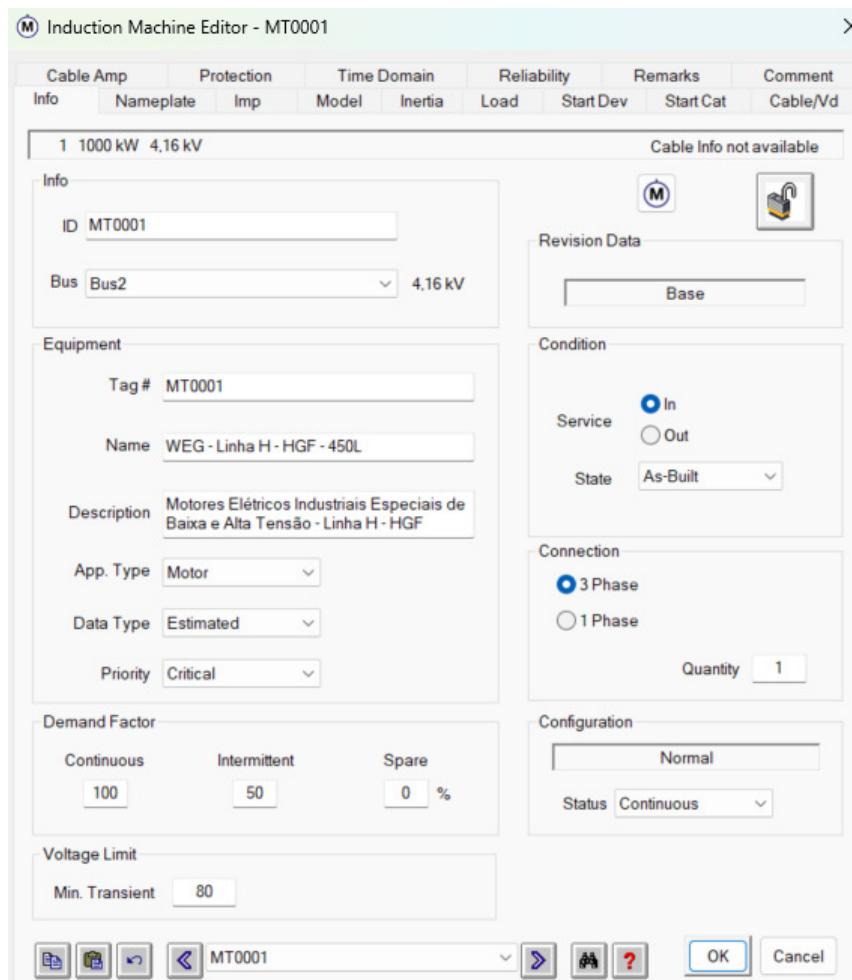
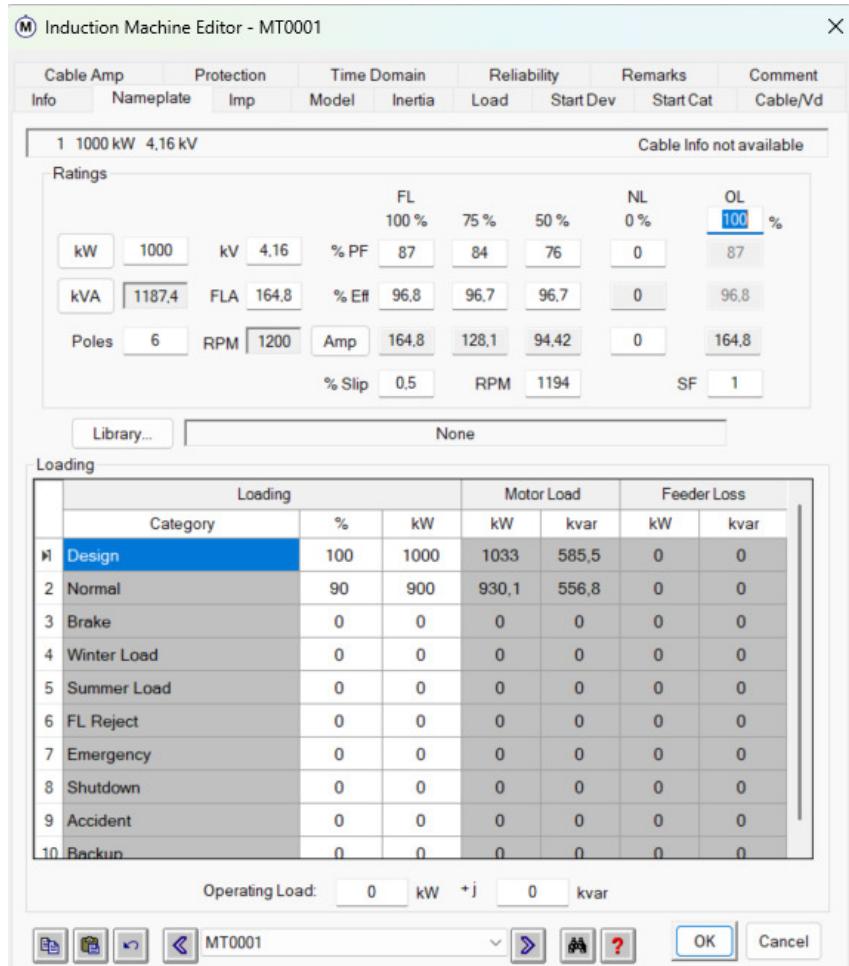


Figura 89 – Interface de configuração da página *Info* do motor.

Fonte: O autor.

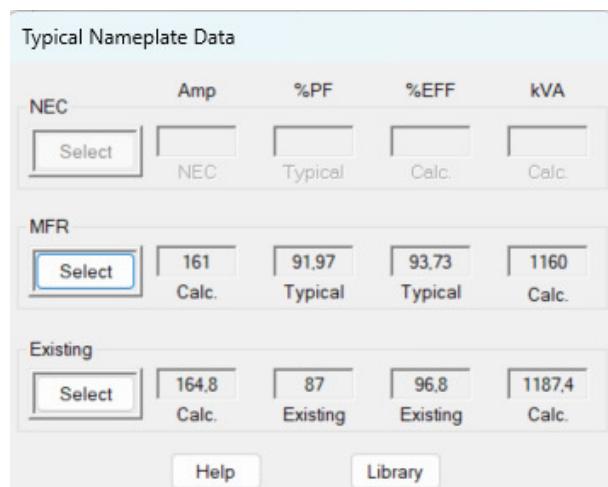
### 3.5.2.1.2 Aba Nameplate

(Figura 90) Aqui são inseridos os dados de placa do motor (potência, tensão, FLA, FP, eficiência, RPM). Uma funcionalidade poderosa é a tabela de carregamento (*Loading*), que permite criar múltiplos cenários operacionais. Para estudos preliminares, a ferramenta *Typical Data* (Figura 91) estima os dados de placa com base em normas como a NEC ou perfis de fabricantes.



**Figura 90 – Interface de configuração da aba Nameplate.**

**Fonte:** O autor.



**Figura 91 – Interface para seleção de dados típicos do motor.**

**Fonte:** O autor.

### 3.5.2.2 Parâmetros para Estudos Dinâmicos (*Impedance e Model*)

Estas abas transformam o motor de uma carga estática em um modelo dinâmico.

#### 3.5.2.2.1 Aba Impedance

(Figura 92) Define os parâmetros de transitórios, como os dados de rotor bloqueado (%LRC, %PF), essenciais para estudos de partida e curto-circuito. É aqui que são definidas as reatâncias de sequência ( $X''$ ,  $X_2$ ,  $X_0$ ) e a configuração de aterramento, que determinam a contribuição do motor para faltas simétricas e assimétricas.

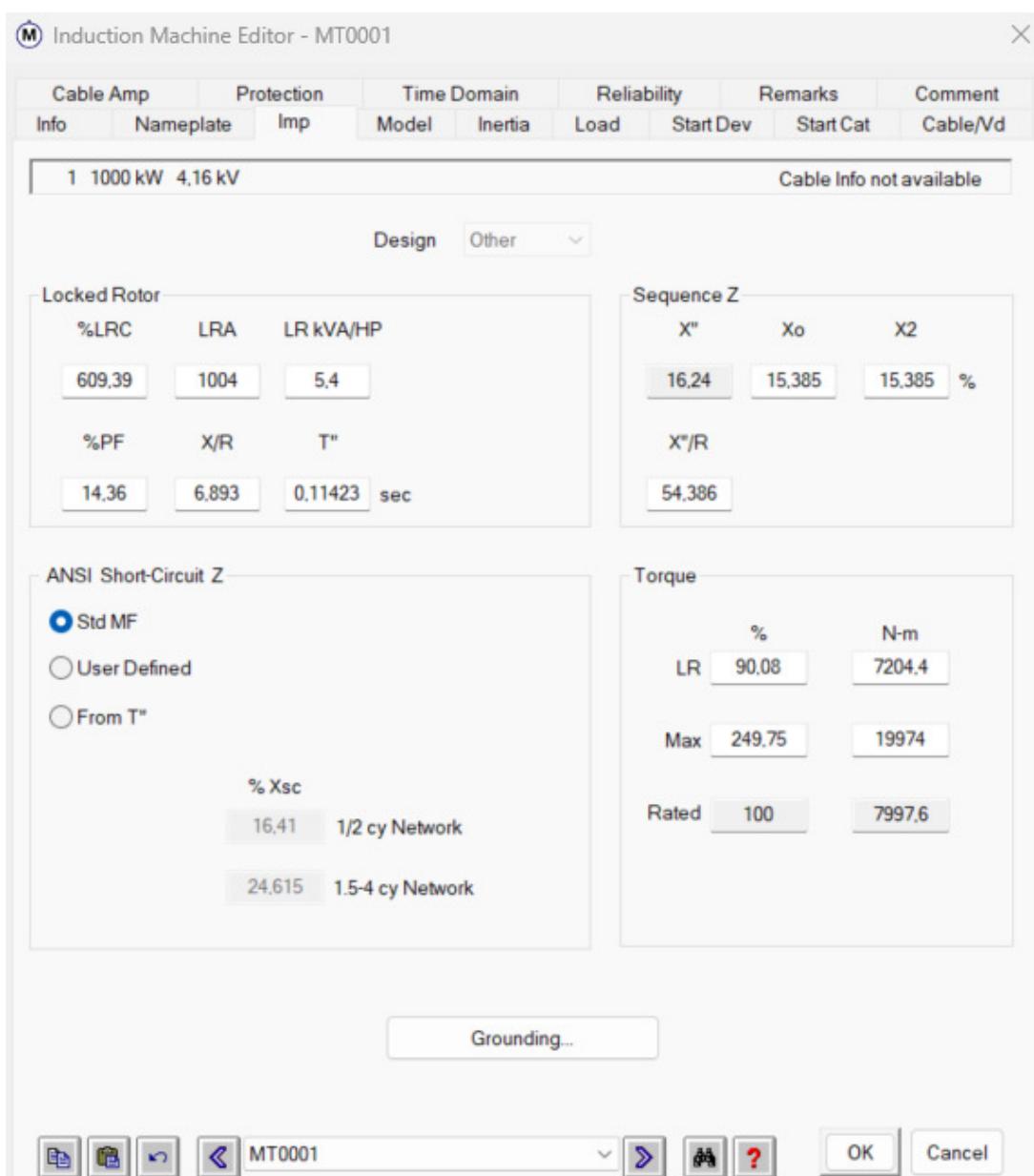


Figura 92 – Interface de configuração de impedâncias do motor.

Fonte: O autor.

### 3.5.2.2.2 Aba Model

(Figura 93) Oferece duas abordagens para simulação dinâmica: o **Modelo de Circuito (CKT Model)**, cujos parâmetros ( $R_1$ ,  $X_1$ , etc.) podem ser derivados via uma ferramenta de estimativa iterativa, e o **Modelo Característico (Characteristic Model)**, que utiliza diretamente as curvas de desempenho (Torque vs. Velocidade) do fabricante como uma tabela de consulta.

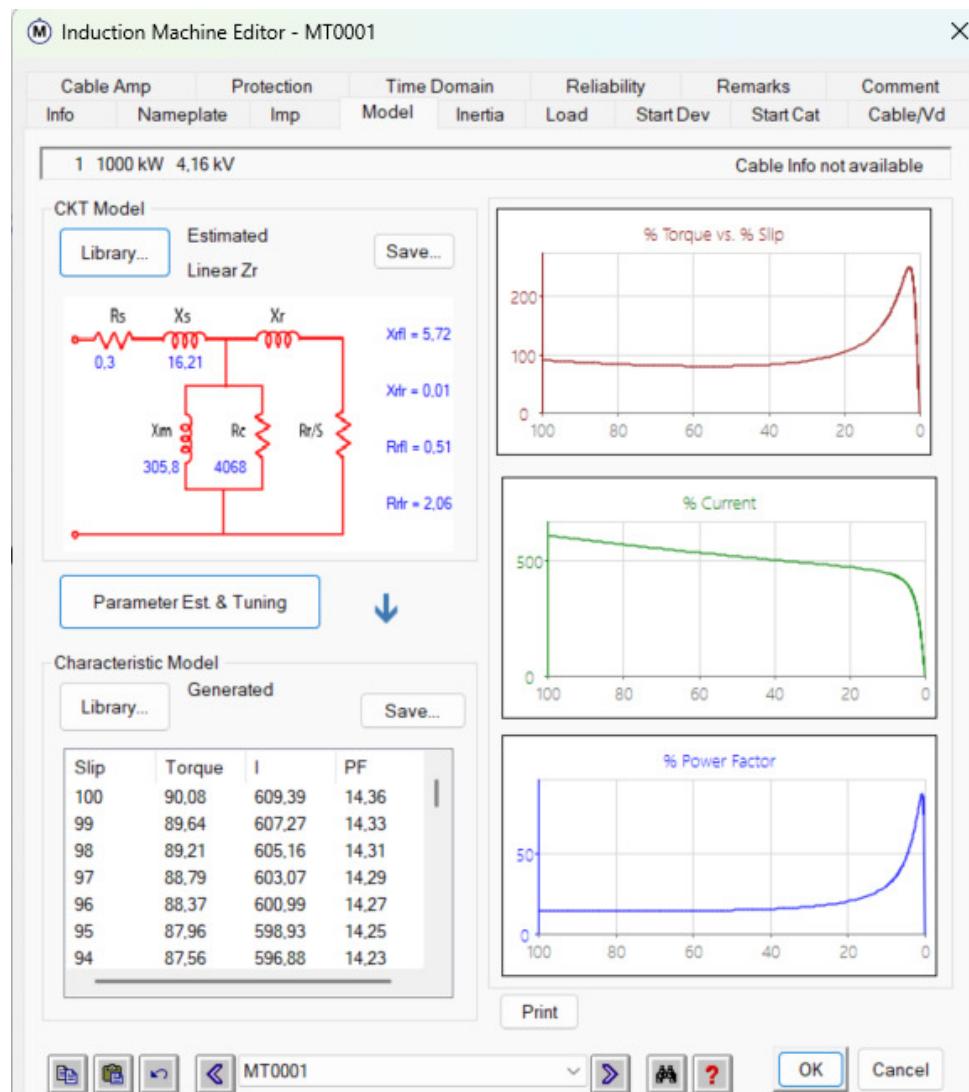


Figura 93 – Interface de definição do modelo dinâmico do motor.

Fonte: O autor.

### 3.5.2.3 Parâmetros e Ferramentas de Proteção (Protection)

A aba *Protection* (Figura 94) é a interface visual para a coordenação de proteções, definindo os limites de atuação para os relés. A **Curva de Partida** representa a corrente de aceleração, uma zona de não atuação, e pode ser estimada ou importada de um estudo de partida já realizado. Em contrapartida, a **Curva de Limite Térmico**, definida pelo tempo de rotor blo-

queado (*Stall Time*), representa a fronteira de dano do equipamento, que a proteção não deve ultrapassar.

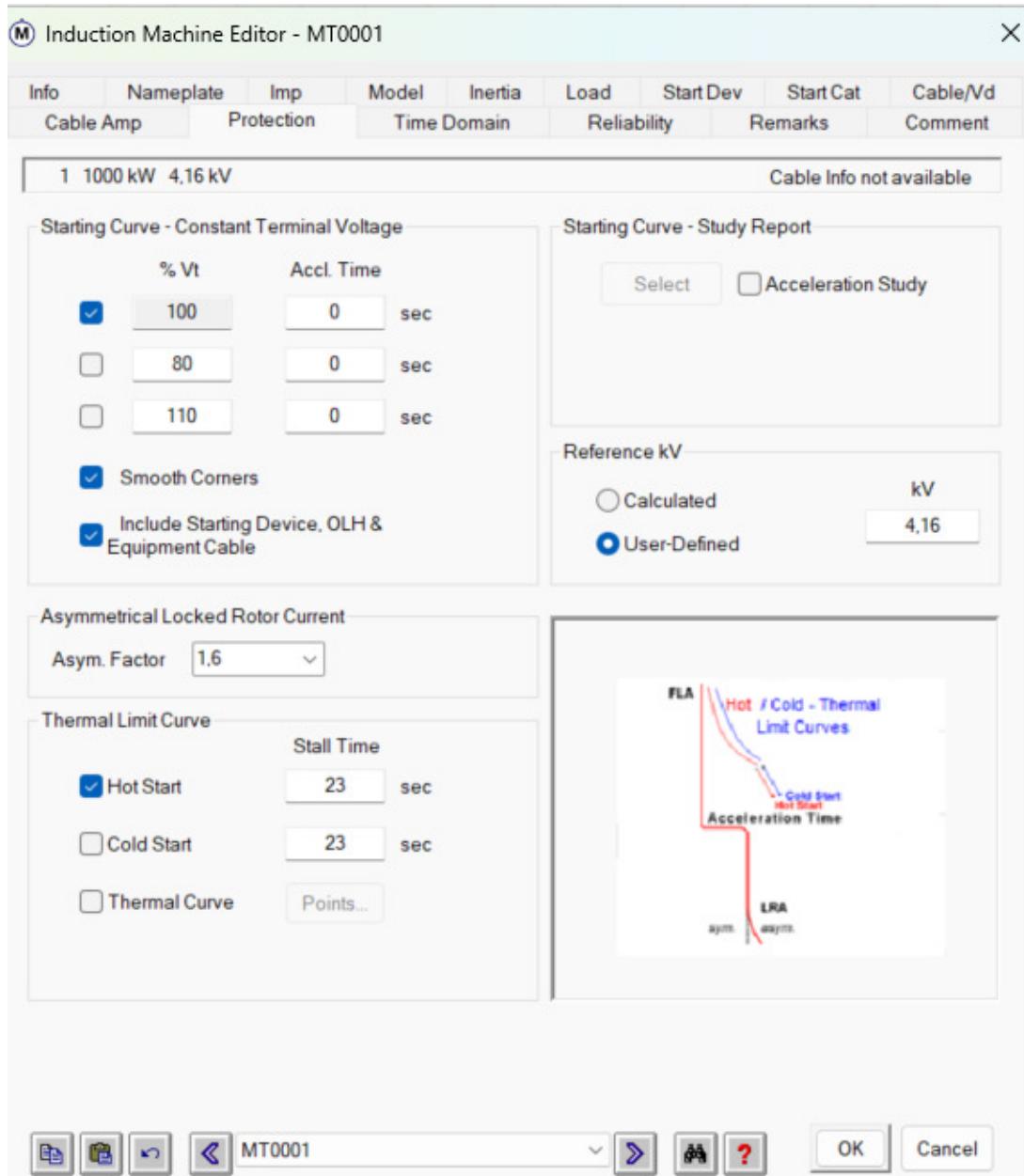


Figura 94 – Interface para configuração das curvas de partida e dano do motor.

Fonte: O autor.

### 3.5.2.4 Configurações Adicionais Integradas

O ETAP se destaca por integrar a modelagem de componentes auxiliares diretamente ao elemento motor, simplificando o diagrama unifilar. As abas **Start Device** (Dispositivo de Partida), **Cable/Vd** (Cabo e Queda de Tensão) e **Cable Amp** (Ampacidade do Cabo) permitem, respectivamente, comparar métodos de partida, modelar o cabo de alimentação de forma integrada e configurar seus parâmetros para estudos de dimensionamento.

### 3.5.3 Modelagem do Motor de Indução no PTW

A modelagem dos motores de indução no PTW é fundamental para a análise de sistemas industriais, onde representam a maior parcela das cargas. O software oferece um elemento detalhado para abranger seu comportamento dinâmico complexo: o motor atua como carga em regime permanente, mas se torna uma fonte temporária de corrente durante curtos-circuitos e impõe severas correntes de partida à rede. A Figura 95 ilustra a localização do elemento na interface.



**Figura 95 – Localização do elemento Motor de Indução na barra de ferramentas do PTW.**

**Fonte:** O autor.

A configuração do motor é realizada em um editor com múltiplas abas (*subviews*), detalhadas a seguir.

#### 3.5.3.1 Dados Gerais e Parâmetros de Estudo (Subview: Induction Motor)

A interface principal (Figura 96) centraliza os dados de placa e os parâmetros que definem o comportamento do motor nos diferentes estudos.

##### *3.5.3.1.1 Dados para Fluxo de Carga*

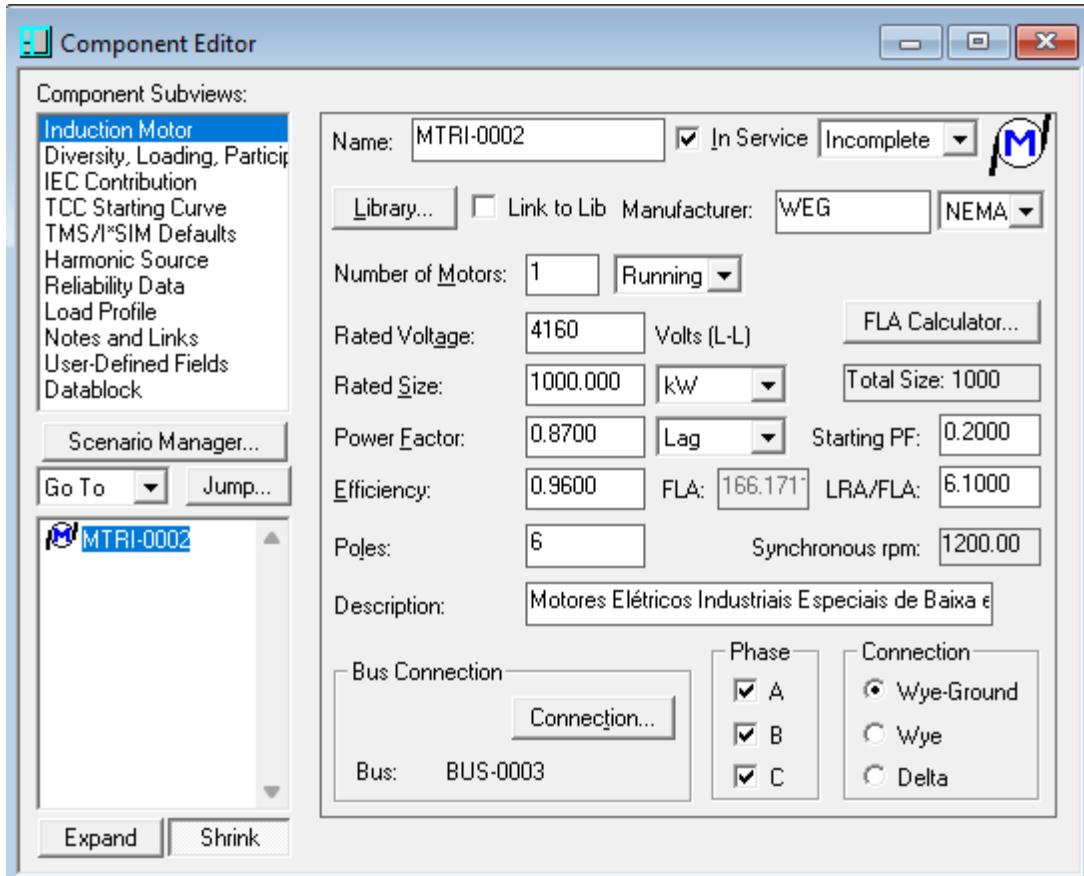
A potência nominal ('**Rated Size**') pode ser inserida em HP (eixo) ou kW (elétrica), e uma calculadora integrada determina a corrente de plena carga (FLA) a partir do fator de potência e do rendimento, agilizando a entrada de dados.

##### *3.5.3.1.2 Dados para Curto-Círcuito e Partida*

O parâmetro mais importante é a relação '**LRA/FLA**' (corrente de partida/corrente nominal), que o software utiliza para calcular a impedância subtransitória ( $X_d''$ ) do motor, determinando tanto a corrente de partida quanto sua contribuição para curtos-circuitos.

##### *3.5.3.1.3 Agrupamento e Conexão*

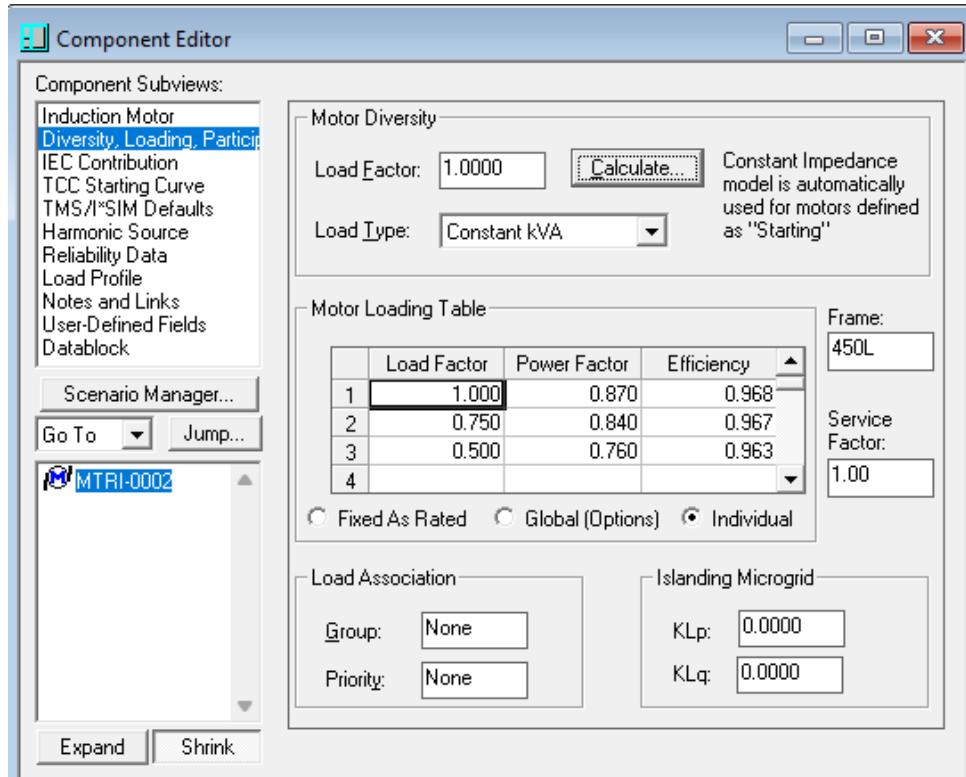
A interface também permite o agrupamento de múltiplos motores idênticos em um único elemento ('**Number of Motors**') e a definição da conexão dos enrolamentos (*Wye/Delta*).



**Figura 96 – Interface principal de configuração do Motor de Indução no PTW.**  
**Fonte:** O autor.

### 3.5.3.2 Condições de Carregamento (Subview: Motor Diversity)

Esta aba (Figura 97) refina a modelagem do motor como carga. O **Fator de Carga (Load Factor)** ajusta a potência nominal para refletir a demanda real. O **Tipo de Carga (Load Type)** define o comportamento da carga em relação à tensão (ex: Potência Constante ou Impedância Constante). Para a máxima precisão, a **Tabela de Carregamento (Motor Loading Table)** permite inserir os valores de fator de potência e rendimento para diferentes pontos de carga, permitindo que o PTW interpole o ponto de operação exato.

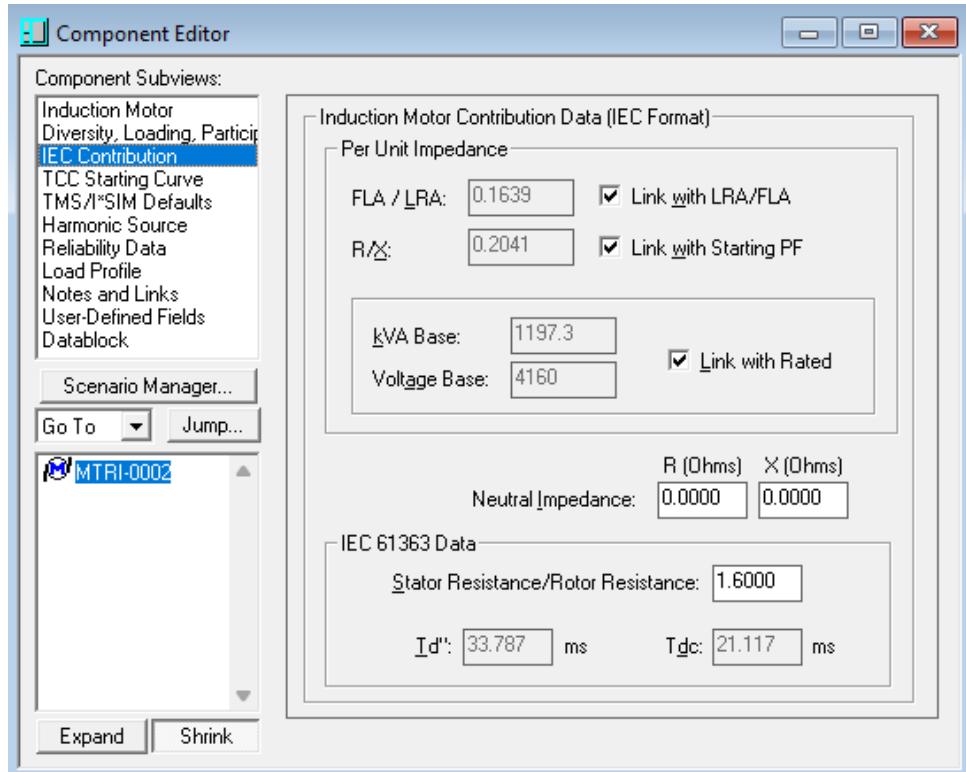


**Figura 97 – Interface de configuração das condições de carregamento na sub-vista *Motor Diversity*.**

**Fonte:** O autor.

### 3.5.3.3 Parâmetros para Curto-Circuito (Subview: IEC Contribution)

Esta aba (Figura 98) é dedicada exclusivamente à parametrização do motor para estudos de curto-círcuito conforme a norma IEC 60909. Os parâmetros chave são a relação ‘FLA/LRA’ e a relação ‘R/X’, que definem a magnitude e o ângulo da impedância subtransitoria do motor, utilizada para calcular sua contribuição de corrente durante uma falta.



**Figura 98 – Interface de configuração da contribuição para curto-círcuito (Norma IEC).**

**Fonte:** O autor.

### 3.5.3.4 Modelagem da Curva de Partida e Dano do Motor

A correta coordenação da proteção de um motor de indução exige a definição de duas fronteiras críticas no diagrama TCC: a curva de partida, que representa uma condição normal que não deve causar atuação, e a curva de dano, que representa o limite térmico que não deve ser ultrapassado. A interface de configuração da partida do motor no PTW é a ferramenta para modelar precisamente essas duas fronteiras.

#### *3.5.3.4.1 Definição da Curva de Partida*

A curva de partida representa a alta corrente consumida pelo motor durante sua aceleração até a velocidade nominal. O dispositivo de proteção deve permitir que essa corrente flua pelo tempo necessário sem atuar. A sua modelagem envolve os seguintes parâmetros:

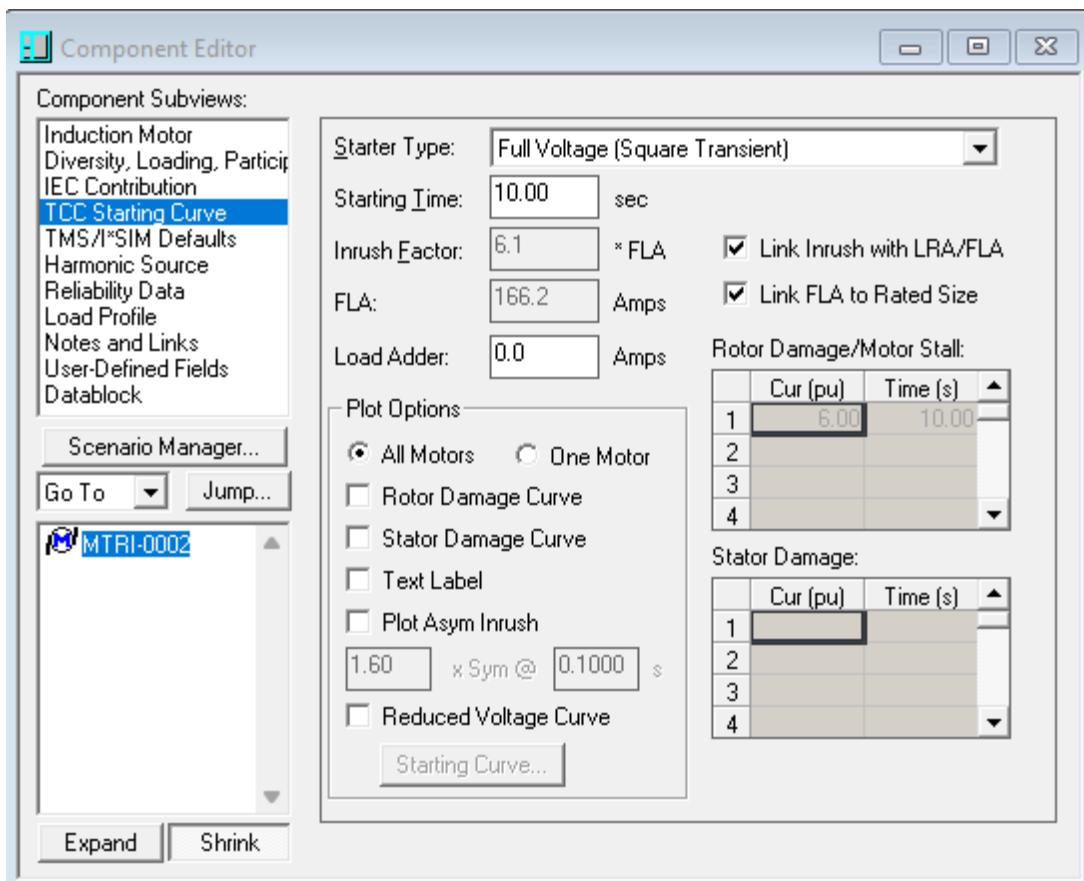
- **Starter Type:** Define o método de partida e, consequentemente, a forma e a magnitude da curva de corrente. As opções variam desde a partida direta (**Full Voltage**), que resulta na maior corrente, até métodos de partida suave (*soft-starters*) como **Autotransformer**, que reduzem a corrente. A opção mais precisa é a **TMS Curve**, que permite importar a curva de partida real, calculada a partir de um estudo dinâmico no módulo PTW TMS.

- **Starting Time:** Define a duração da partida em segundos. Este parâmetro ajusta a posição **vertical** da curva no TCC. Cargas com alta inércia exigem tempos de partida maiores.
- **Inrush Factor:** Define a magnitude da corrente de partida, geralmente igual à relação LRA/FLA. Este parâmetro ajusta a posição **horizontal** da curva. A opção **Link inrush with LRA/FLA** garante a consistência com os dados de curto-círcuito do motor.

#### *3.5.3.4.2 Definição das Curvas de Dano Térmico*

As curvas de dano representam o limite de suportabilidade térmica do motor. A proteção é considerada adequada somente se sua curva de atuação estiver abaixo (à esquerda) da curva de dano.

- **Rotor Damage Curve:** É o parâmetro mais crítico, também conhecido como **curva de tempo máximo de rotor bloqueado (stall time)**. Ela define por quanto tempo o motor pode suportar a corrente de partida (LRA) sem que o calor cause danos permanentes ao rotor. O usuário insere pontos de tempo vs. corrente, geralmente obtidos da folha de dados do motor, para plotar esta fronteira.
- **Stator Damage Curve:** De forma análoga, representa o limite térmico do isolamento dos enrolamentos do estator.



**Figura 99 – Interface para modelagem das curvas de partida e dano do motor.**

**Fonte:** O autor.

### 3.5.4 Análise Crítica e Quadro Comparativo de Motores de Indução

A análise detalhada da modelagem de motores de indução revela filosofias e pontos fortes distintos entre as três plataformas. Embora todos os softwares ofereçam modelos robustos para análises de fluxo de potência, curto-círcuito e partida, a abordagem, o fluxo de trabalho e as ferramentas auxiliares variam significativamente. A Tabela 8 consolida as principais características observadas.

**Tabela 8 – Quadro Comparativo da Modelagem de Motores de Indução nos Softwares.****Fonte:** O autor.

Funcionalidade	DIGSILENT PowerFactory	ETAP	PTW (SKM)
<b>Filosofia de Modelagem</b>	Estrutura de dois níveis: <b>Tipo</b> (TypAsm) para dados técnicos e <b>Elemento</b> (ElmAsm) para dados operacionais.	Objeto único com múltiplas <b>páginas</b> de configuração. Foco na praticidade e integração de ferramentas.	Objeto único com múltiplas <b>sub-vistas</b> , separando dados gerais, carregamento, impedâncias e proteção.
<b>Criação do Modelo</b>	Dois modos no "Tipo": <b>Estimação</b> de parâmetros a partir de dados de placa ou <b>inserção direta</b> do circuito equivalente.	Dois modelos dinâmicos: <b>CKT Model</b> , com estimação de parâmetros, ou <b>Characteristic Model</b> , usando curvas do fabricante.	Foco na entrada de dados de placa ( <i>Nameplate</i> ) e de partida ( <i>LRA/FLA</i> ) para o cálculo interno do modelo.
<b>Dados para Proteção</b>	Definição dos tempos de rotor bloqueado ( <i>stall time</i> ) e parâmetros de inrush no TypAsm.	Aba dedicada ( <i>Protection</i> ) para definir a curva de dano (baseada no <i>stall time</i> ) e a curva de partida (estimada ou de estudo).	Sub-vista dedicada ( <i>Damage Curve</i> ) para gerar a curva de dano por normas (ANSI/IEC) e modelar a característica de inrush.
<b>Ferramentas Adicionais</b>	Modelo de máquina de indução duplamente alimentada ( <i>Double-Fed</i> ) disponível.	Extremamente completo: <b>Agrupamento</b> de motores, <b>dispositivos de partida</b> e <b>cabo de alimentação</b> integrados ao elemento.	Foco na flexibilidade do carregamento com a aba <b>Motor Diversity</b> e a tabela de carregamento.
<b>Diferencial Notável</b>	Estrutura Tipo/Elemento, ideal para padronização em grandes sistemas, e modelo avançado de saturação (TypAsm1).	A abordagem de <b>modelagem integrada</b> (motor + cabo + partida), que simplifica o diagrama e aumenta a precisão dos estudos.	A clareza na separação das sub-vistas para cada tipo de estudo (Fluxo de Carga, IEC Contribution, TCC Curve).

### 3.5.4.0.1 Conclusão da Análise

A análise comparativa, sintetizada na Tabela 8, demonstra que os três softwares são extremamente competentes na modelagem de motores, cada um com seus diferenciais. O DIGSILENT PowerFactory oferece grande rigor acadêmico e flexibilidade com sua estrutura de Tipos e a estimação de parâmetros. O ETAP se destaca como a ferramenta mais integrada e prática para projetos industriais, ao permitir a modelagem de múltiplos componentes (motor, cabo,

dispositivo de partida) em um único elemento. Por fim, o PTW apresenta uma interface muito estruturada e transparente, com sub-vistas dedicadas que guiam o usuário através dos parâmetros necessários para cada tipo de estudo, desde o fluxo de carga até a detalhada coordenação da proteção.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA

A modelagem detalhada dos quatro componentes elétricos fundamentais — geradores, linhas de transmissão, transformadores e motores — nas plataformas **DIGSILENT PowerFactory**, **ETAP** e **PTW** revelou filosofias e capacidades distintas. A análise a seguir consolida os resultados desta investigação, avaliando cada software com base nos critérios de Flexibilidade de Modelagem, Facilidade de Uso, Recursos Adicionais e Rigor Técnico.

### 4.1 Análise Comparativa por Componente

#### 4.1.1 Geradores Síncronos

A modelagem de geradores síncronos é uma funcionalidade robusta nas três plataformas. O **DIGSILENT PowerFactory** destaca-se pela sua *Flexibilidade de Modelagem*, graças à filosofia de "Tipo/Elemento" que permite a padronização em grandes sistemas. O **ETAP** oferece a maior *Facilidade de Uso*, com uma interface organizada em páginas e a prática ferramenta "Typical Data". Em *Recursos Adicionais*, o **PTW** apresenta o diferencial mais notável com a modelagem explícita do estatismo ( $K_{Gp}$  e  $K_{Gq}$ ) para estudos de microrredes, enquanto o **ETAP** oferece a melhor ferramenta integrada para análise da curva de decremento. Quanto ao *Rigor Técnico*, as três plataformas demonstram alta aderência às normas, com leve vantagem para o **PTW** e **PowerFactory** pela transparência e granularidade na aplicação de parâmetros da norma IEC 60909.

#### 4.1.2 Linhas de Transmissão e Cabos

A abordagem para modelagem de linhas e cabos revelou as maiores diferenças filosóficas. O **DIGSILENT PowerFactory** novamente lidera em *Flexibilidade de Modelagem* com sua abordagem hierárquica que permite o cálculo de parâmetros a partir da geometria detalhada da torre. O **ETAP** é inigualável em *Recursos Adicionais*, sendo o único a integrar, no mesmo elemento, análises de engenharia mecânica (Flecha e Tração), térmica (Ampacidade) e elétrica (Compensação). Isso também o torna a ferramenta de maior *Facilidade de Uso* para projetos completos. O **PTW** demonstra o maior *Rigor Técnico* para um nicho específico e crucial: a análise de acoplamento mútuo através de seu "Enhanced Transmission Line Model", fundamental para estudos de proteção de alta precisão em corredores com múltiplas linhas.

#### 4.1.3 Transformadores de Força

Na modelagem de transformadores, a competência é alta em todas as plataformas, com os diferenciais nos detalhes. Em *Flexibilidade de Modelagem*, o **DIGSILENT PowerFactory** se destaca pela capacidade de modelar a impedância dependente do tap e transformadores defasadores (PSTs). Em *Recursos Adicionais e Facilidade de Uso*, o **ETAP** leva vantagem com suas ferramentas práticas como a "Otimização de Tap" para usinas e a estimativa via "Typical Data". O **PTW** demonstra grande *Rigor Técnico* em sua sub-vista *Damage Curve*, que permite a geração de curvas de dano por norma (ANSI/IEC) e inclui a modelagem do limite de dano mecânico, um detalhe técnico de grande importância para a proteção.

#### 4.1.4 Motores de Indução

A análise de motores evidenciou o foco de cada software no ambiente industrial. O **ETAP** se destaca como a plataforma com os melhores *Recursos Adicionais* e a maior *Facilidade de Uso* para projetos industriais, graças à sua abordagem de **modelagem integrada**, que permite incluir o motor, seu dispositivo de partida e seu cabo de alimentação em um único elemento, simplificando o diagrama e aumentando a precisão. Em *Flexibilidade de Modelagem*, há um empate entre o **DIGSILENT PowerFactory**, com sua estimação de parâmetros e modelo de saturação, e o **ETAP**, com seus modelos CKT e Característico. O **PTW**, por sua vez, demonstra grande rigor técnico em sua abordagem. Para estudos de proteção, o software permite uma parametrização detalhada da curva de dano do equipamento, incluindo a geração por normas (ANSI/IEC) e a consideração do limite de dano mecânico. Já para o fluxo de potência, sua alta fidelidade é garantida pela configuração precisa das condições de carregamento real, por meio de tabelas que ajustam o rendimento e o fator de potência.

### 4.2 Quadro Comparativo Geral e Conclusão

Para garantir uma interpretação objetiva dos resultados, foi estabelecida previamente uma escala de classificação qualitativa. A Tabela 10 detalha a hierarquia e a definição técnica de cada termo avaliativo adotado.

Com base nestes critérios e na experiência prática das simulações, a pesquisa consolida a avaliação global das três plataformas, conforme sintetizado na Tabela 9.

**Tabela 9 – Quadro Avaliativo Geral das Plataformas de Software.**

Fonte: O autor.

Critério de Avaliação	DIGSILENT PowerFactory	ETAP	PTW (SKM)
<b>Flexibilidade de Modelagem</b>	<b>SUPERIOR</b> A filosofia Tipo/Elemento e a abordagem hierárquica (ex: linhas) oferecem o mais alto grau de flexibilidade e customização, ideal para modelar qualquer tipo de sistema com grande detalhamento.	<b>ALTO</b> Oferece modelos detalhados e robustos para todos os componentes, com um foco notável na praticidade e na representação de múltiplos cenários operacionais.	<b>ALTO</b> Embora com menos opções de customização que o PowerFactory, seus modelos (ex: "Enhanced" para linhas) demonstram uma flexibilidade focada na precisão para estudos específicos.
<b>Facilidade de Uso / Curva de Aprendizagem</b>	<b>MODERADO</b> A estrutura orientada a objetos exige um entendimento inicial mais aprofundado, mas se torna extremamente poderosa e organizada após a familiarização.	<b>ALTO</b> A interface baseada em páginas é a mais intuitiva. Ferramentas como "Typical Data" e a modelagem integrada são focadas em otimizar o fluxo de trabalho do engenheiro de projetos.	<b>ALTO</b> As sub-vistas dedicadas para cada tipo de estudo (Fluxo de Carga, IEC, Proteção) guiam o usuário de forma clara, tornando a inserção de dados muito estruturada.
<b>Recursos Adicionais</b>	<b>ALTO</b> mas com foco em recursos de análise de sistemas de grande porte, como a modelagem de PSTs e Bobina de Petersen.	<b>SUPERIOR</b> É a plataforma que oferece o conjunto mais completo de ferramentas de engenharia integradas em um único elemento, abrangendo análises elétricas, mecânicas e térmicas.	<b>ESPECÍFICO</b> Seus recursos são focados em alta precisão para nichos importantes, como o módulo TMS para partida de motores e o modelo de estatismo para microrredes.
<b>Rigor Técnico e Aderência a Normas</b>	<b>SUPERIOR</b> Demonstra grande detalhamento e granularidade na aplicação de parâmetros de normas internacionais, sendo uma referência em estudos acadêmicos e de P&D.	<b>SUPERIOR</b> Possui vasta biblioteca de normas (ANSI, IEC) e ferramentas validadas pela indústria, como a análise da curva de decremento, focando na aplicação prática das normas.	<b>SUPERIOR</b> A transparência na separação dos dados para cada norma (ex: aba IEC Contribution) e o detalhamento nos modelos de proteção (ex: curva de dano mecânico) evidenciam um grande rigor técnico.

Nota: Para a definição dos termos avaliativos, consulte a Tabela 10.

**Tabela 10 – Definição da Escala de Classificação Qualitativa (Ordem Decrescente de Desempenho)**

Classificação	Definição do Critério
<b>1. Superior</b>	<b>Nível de Excelência.</b> A plataforma supera os requisitos padrão, oferecendo recursos exclusivos, detalhamento técnico de referência ou ferramentas inovadoras que a destacam como líder naquele quesito.
<b>2. Alto</b>	<b>Nível Robusto.</b> A plataforma atende plenamente e com eficiência a todas as demandas de engenharia propostas, sem apresentar lacunas significativas.
<b>3. Específico</b>	<b>Nível de Destaque Setorial.</b> A plataforma apresenta excelência pontual em nichos determinados (ex: proteção de motores), embora possa ter escopo ou flexibilidade limitados em outras áreas generalistas.
<b>4. Moderada</b>	<b>Nível Funcional com Ressalvas.</b> A plataforma executa a tarefa proposta, mas apresenta barreiras, como curva de aprendizado acentuada, interface complexa ou menor flexibilidade de customização.

**Fonte:** O Autor.

#### 4.2.0.0.1 Conclusão Final da Análise

A análise comparativa evidencia que não há um software universalmente "melhor", mas sim ferramentas com focos e pontos fortes distintos. O **DIGSILENT PowerFactory** se consolida como a plataforma mais poderosa e flexível, ideal para concessionárias, operadores de sistema e pesquisadores que lidam com grandes redes e necessitam de alta customização. O **ETAP** destaca-se como a ferramenta mais completa e produtiva para o **engenheiro de projetos**, especialmente em ambientes industriais, graças à sua interface intuitiva e ao seu inigualável conjunto de ferramentas de análise integradas. Por fim, o **PTW (SKM)** apresenta-se como uma plataforma extremamente robusta e transparente, com um foco notável em **estudos de proteção**. A precisão em seus modelos para seletividade, como a detalhada *Damage Curve* e o modelo de acoplamento mútuo, e a clareza na aplicação das normas são seus fatores preponderantes.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso propôs-se a realizar uma análise técnica e comparativa das metodologias de modelagem de componentes essenciais do Sistema Elétrico de Potência (SEP) em três das mais proeminentes plataformas de software da indústria: DlgSILENT *PowerFactory*, ETAP e PTW. Através da parametrização detalhada de geradores síncronos, linhas de transmissão, transformadores de força e motores de indução, utilizando como base dados de equipamentos reais, foi possível avaliar as filosofias de trabalho, funcionalidades e diferenciais de cada ferramenta.

Os capítulos anteriores demonstraram que, embora os três softwares sejam capazes de representar os ativos elétricos com alta fidelidade, eles o fazem com abordagens distintas, direcionadas a diferentes perfis de usuários e aplicações. As conclusões desta análise são consolidadas a seguir.

### 5.1 Conclusões da Análise Comparativa

A investigação revelou que não há uma plataforma universalmente superior, mas sim uma ferramenta mais adequada para cada tipo de desafio de engenharia. A Tabela 9 (apresentada no capítulo anterior) sintetiza as características de cada software, e a análise final pode ser resumida da seguinte forma:

- **DlgSILENT PowerFactory** consolidou-se como a plataforma de maior **flexibilidade e rigor acadêmico**. Sua filosofia de dados orientada a objetos (Tipo/Elemento) e sua estrutura hierárquica (ex: na modelagem de linhas) oferecem uma capacidade de padronização e gestão de ativos em larga escala inigualável. É a ferramenta de escolha para concessionárias, operadores de sistema, consultorias e pesquisadores que lidam com grandes redes e necessitam de alta customização para estudos complexos e de P&D.
- **ETAP** destacou-se como a ferramenta mais **integrada e produtiva para o engenheiro de projetos**. Sua abordagem de "tudo-em-um", com uma interface intuitiva baseada em páginas e um conjunto robusto de ferramentas de análise integradas (como ampacidade, flecha/tração e modelagem de componentes auxiliares de motores), otimiza o fluxo de trabalho. É a plataforma ideal para projetos de engenharia "turn-key" em plantas industriais e comerciais, onde a praticidade e a riqueza de recursos são cruciais.
- **PTW (SKM)** apresentou-se como uma plataforma extremamente **estruturada e transparente**, com um foco notável em **estudos de proteção e de alta confiabilidade**. Sua organização em sub-vistas dedicadas para cada norma e tipo de estudo guia o usuário de forma clara. O detalhamento em seus módulos de proteção (como a modelagem da

*Damage Curve*) e a precisão em análises complexas, como o acoplamento mútuo em linhas, evidenciam um grande rigor técnico, tornando-o uma ferramenta poderosa para estudos de seletividade e de sistemas onde a continuidade do serviço é prioritária.

Conclui-se, portanto, que a escolha da plataforma de software deve ser guiada pela natureza do problema a ser resolvido. A excelência de um projeto de engenharia de sistemas de potência reside não apenas na qualidade dos dados de entrada, mas também na seleção da ferramenta cujas capacidades e filosofia de trabalho estejam mais alinhadas com os objetivos técnicos e operacionais do estudo.

## 5.2 Perspectivas para Trabalhos Futuros

A presente pesquisa focou na análise detalhada da modelagem estática e de curto-círcuito dos componentes. Como desdobramento natural deste trabalho, sugerem-se as seguintes perspectivas para futuras investigações:

- **Análise Comparativa de Estudos Dinâmicos:** Utilizar os modelos detalhados desenvolvidos neste TCC como base para a realização de estudos de estabilidade transitória. A comparação dos resultados de simulação dinâmica e do desempenho computacional dos *solvers* de cada software para um mesmo evento (como um curto-círcito ou a partida de um grande motor) seria uma contribuição de grande valor.
- **Expansão para Fontes Renováveis e Eletrônica de Potência:** Ampliar o escopo da análise para incluir a modelagem de componentes baseados em eletrônica de potência, como geradores eólicos, usinas fotovoltaicas e sistemas de armazenamento de energia (BESS), comparando as bibliotecas de modelos e as ferramentas de simulação (RMS e EMT) que cada plataforma oferece para estes novos desafios da rede.
- **Estudo de Caso com Validação de Campo:** Como trabalho futuro de maior complexidade, sugere-se a aplicação da metodologia deste TCC a um sistema industrial ou de distribuição real, com a posterior validação dos resultados da simulação (como afundamentos de tensão durante a partida de um motor) com medições realizadas em campo, comparando a acuracidade de cada software em relação a dados reais.

Estas sugestões representam caminhos promissores para a continuidade da pesquisa, aprofundando a compreensão das capacidades e limitações das modernas ferramentas de análise de sistemas de potência.

## REFERÊNCIAS

AL-AKAYSHEE, A. S. *et al.* Investigation of the performance of iraqi 400kv electrical network in digsilent power factory. In: **2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)**. [S.I.: s.n.], 2020. p. 1–6.

Alubar Altec. **Catálogo Técnico: Condutores Elétricos de Alumínio**. 5. ed. Barcarena, PA, 2022. Disponível em:  
<https://www.alubar.net.br/wp-content/uploads/2022/05/catalogo-tecnico-alubar.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2025.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5356-1: Transformadores de potência - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2012.

BRUSH Electrical Machines Ltd. **Electrical Data Sheet: Synchronous AC Generator BDAX 72-290ER**. [S.I.], 2012. Documento técnico submetido pela Pratt & Whitney, contendo a ficha de dados elétricos (datasheet) do gerador BRUSH BDAX 72-290ER como parte da documentação do projeto. As especificações detalhadas podem ser encontradas no apêndice do PDF. Disponível em: [https://www.caiso.com/documents/pwpssupplementalcomments\\_reactivepowerrequirements\\_financialcompensation-issuepaper.pdf](https://www.caiso.com/documents/pwpssupplementalcomments_reactivepowerrequirements_financialcompensation-issuepaper.pdf).

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

CIGRÉ Working Group C4.502. **Power system test cases for EMT-type simulation studies**. [S.I.], 2018. Study Committee C4: Power system technical performance.

DigSILENT GmbH. **PowerFactory 2024 User Manual**. Gomaringen, Germany, 2024. 1303 pages.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

FORTESCUE, C. L. C. L. Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. In: **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**. [S.I.]: AIEE, 1918. XXXVII, n. 2, p. 1027–1140.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1994. Based on "Elements of power system analysis" by William D. Stevenson. Alternative ISBN for ordering: 0-07-113338-0. ISBN 0-07-061293-5.

HIRAKAMI, M.; NEUGEBAUER, W. Transient network analyzer operation with digital computer control and analysis. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100, p. 1597–1607, 4 1981. ISSN 0018-9510.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book)**. 2001. (IEEE Std 242-2001).

Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE Guide for Liquid-Immersed Transformers Through-Fault-Current Duration**. New York, NY: IEEE, 2018.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. standard, **Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents**. 2001. First edition (2001-07), includes Corrigendum 1 (2002-02).

KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 2. ed. Porto Alegre: SAGRA LUZZATTO, 1997. ISBN 85-241-0368-X.

LIU, Y. *et al.* Application of the power flow calculation method to islanding micro grids. In: **2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**. [S.I.: s.n.], 2009. p. 1–6.

MARDEGAN, C. **Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais**. 2. ed. Barueri, SP: EngePower, 2022. ISBN 978-65-00-51991-4.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1983.

PRATICO, E.; EITZMANN, M. A microcomputer-based data acquisition system for transient network analyzer operation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 2, p. 812–818, May 1994. ISSN 1558-0679.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. ISBN 978-85-352-6886-7.

SIDDIQUE, A. *et al.* Load flow analysis of 132/11 kv grid station bahawalpur region pakistan and its voltage improvement through facts devices using etap. In: **2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)**. [S.I.: s.n.], 2019. p. 922–927. ISSN 2378-8542.

SKM Systems Analysis, Inc. **Power\*Tools for Windows V10.0 User's Guide**. 10.0. ed. Manhattan Beach, CA, 2021. Data de publicação: 09 de novembro de 2021.

Southwire Company. **Overhead Conductor Manual**. 2nd. ed. Carrollton, GA, 2007. ISBN: 978-0-9791493-0-1.

STEVENSON JR., W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. Tradução e revisão técnica por Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Minussi e Somchai Ansuj.

TECHNOLOGY, I. O. **ETAP User Guide**. Irvine, California, 2019. 6941 p.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2014. Recurso eletrônico. ISBN 978-85-8055-374-1.

WEG. **Motores de Indução Trifásicos: Linha HGF - Folha de Dados**. Jaraguá do Sul, 2023. Acesso em: 19 nov. 2025. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/c/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o-Trif%C3%A1sicos---Linha-HGF/p/MKT\\_WMO\\_BR\\_HGF](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/c/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o-Trif%C3%A1sicos---Linha-HGF/p/MKT_WMO_BR_HGF).

WEG Equipamentos Elétricos S.A. **Folha de Dados: Transformador Abaixador**. [S.I.], 2025. Código do Produto: 14149440. Norma/Especificação: NBR 5356.

## **APÊNDICE A – Overview**

O objetivo desta seção é apresentar uma visão geral do funcionamento de cada um dos softwares analisados, destacando suas principais características, estrutura de dados e capacidades de simulação.

#### A.0.1 DIgSILENT PowerFactory

O DIgSILENT PowerFactory se consolida como uma plataforma de engenharia robusta, oferecendo uma solução completa e integrada para a análise de sistemas elétricos de potência (DIgSILENT GmbH 2024). Projetado para atender às complexas demandas dos setores de transmissão, distribuição e industrial, o software unifica um vasto conjunto de ferramentas em um ambiente único e coeso.

O grande diferencial do *PowerFactory* reside em sua arquitetura fundamentalmente integrada. Ao contrário de abordagens modulares, ele opera sobre um banco de dados centralizado e orientado a objetos, onde cada componente modelado é um objeto com classes e tipos definidos. Essa estrutura elimina a redundância e a necessidade de conversão de dados, garantindo um fluxo de trabalho consistente. Para gerenciar a complexidade, o software utiliza uma estrutura de dados hierárquica, organizada em **Projetos, Casos de Estudo e Variações**, o que permite modelar, comparar e gerenciar múltiplos cenários de operação e expansão de forma organizada e com total reprodutibilidade.

Sua capacidade de simulação é vasta, cobrindo desde análises fundamentais até as mais avançadas, como otimização de redes, análise de risco de arco elétrico, simulações de transitórios eletromecânicos (RMS) e eletromagnéticos (EMT), além de estudos econômicos e de confiabilidade. Toda essa funcionalidade é controlada através de uma interface gráfica intuitiva, onde o diagrama unifilar atua como uma ferramenta de trabalho interativa.

Reconhecendo as diversas necessidades de seus usuários, o *PowerFactory* oferece notável flexibilidade, com diferentes modalidades de licença (comercial, acadêmica) e edições que vão do uso individual (*Single-User*) a ambientes colaborativos (*Team Edition*). Adicionalmente, a automação via linguagens DPL e Python permite a personalização e a expansão de suas funcionalidades.

Para o cenário brasileiro, sua compatibilidade nativa com os softwares **ANAREDE** e **ANAFAS** do CEPEL é uma característica crucial. Esse fator o posiciona como uma ferramenta indispensável para a realização de estudos alinhados aos requisitos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para o Sistema Interligado Nacional (**SIN**).

#### A.0.2 ETAP (Electrical Transient Analyzer Program)

O ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) se estabelece como uma solução de software abrangente para o projeto, simulação e análise de sistemas de energia elétrica, com

aplicação em toda a cadeia de energia, da geração a sistemas industriais (Technology 2019). A organização do trabalho na plataforma é baseada em projetos, onde cada projeto encapsula um banco de dados próprio (compatível com ODBC, como Microsoft SQL), seus componentes elétricos e controles de acesso de usuários.

Desenvolvido sob a filosofia "de engenheiros para engenheiros", o software integra múltiplas disciplinas de sistemas de potência em um único ambiente. Sua interface gráfica oferece diversas visualizações, como diagramas de redes CA e CC, malhas de aterramento e painéis de controle, permitindo que os usuários editem propriedades e visualizem resultados de forma interativa.

A característica central do ETAP é o uso de um banco de dados comum, que permite a um único elemento (um cabo ou relé, por exemplo) conter todas as informações para diferentes tipos de análises (elétricas, físicas e de proteção). Essa integração profunda possibilita simulações detalhadas e precisas, como a atuação automática de um relé durante uma análise de transitórios. O ETAP também inclui extensas bibliotecas de fabricantes que podem ser personalizadas.

No contexto regulatório brasileiro, o ETAP possui as ferramentas para realizar estudos em conformidade com as diretrizes do ONS. Contudo, sua interoperabilidade com formatos de arquivo específicos do CEPEL, como o ANAFAS, geralmente requer rotinas de conversão ou módulos de compatibilidade, representando um fluxo de trabalho distinto em comparação a plataformas com integração nativa.

#### A.0.3 SKM Power\*Tools for Windows (PTW)

O SKM *Power\*Tools for Windows* (PTW) é um software de análise de engenharia elétrica que opera em um ambiente baseado em projetos, onde cada projeto representa um sistema elétrico completo, incluindo seus componentes e topologia de rede (SKM Systems Analysis, Inc. 2021).

O trabalho no PTW é centrado em dois ambientes principais interligados a um banco de dados central: o **One-Line Diagram** e o **Component Editor**. O Diagrama Unifilar é uma interface visual e interativa para construir e analisar o sistema, com as alterações sendo refletidas em tempo real no banco de dados. Em paralelo, o Editor de Componentes oferece uma interface tabular para a inserção detalhada de atributos dos componentes. As duas interfaces mantêm um link de dados ativo (*Live Data Link*) com o banco de dados do projeto, garantindo total consistência.

A estrutura de dados do software é organizada de forma hierárquica. Na base estão os **Projetos**, que representam o sistema elétrico total e devem ser armazenados em pastas individuais. Um projeto é formado por **Componentes e Atributos**. Para agilizar a modelagem, o PTW utiliza **Bibliotecas** com dados de referência padrão, que são personalizáveis e podem ser compartilhados entre projetos.

As funcionalidades de análise incluem os **Estudos (Studies)**, que são o núcleo do software, e a função de **Consultas (Queries)**, que permite filtrar componentes com base em qualquer atributo. Os resultados podem ser apresentados de várias formas: através de **Relatórios (Reports)** em texto ASCII, por meio de **Crystal Reports** para saídas tabulares profissionais, ou interativamente na tela usando **Datablocks**.

Para garantir a interoperabilidade, o PTW permite exportar os diagramas unifilares para os formatos WMF ou AutoCAD DXF, e os dados do projeto para arquivos de texto ASCII, facilitando a integração com outras aplicações de CAD, planilhas ou bancos de dados.

## **APÊNDICE B – Folha de Dados dos Equipamentos**

## FOLHA DE DADOS



### Identificação

Código do produto: 14149440  
 Tipo : Transformador abaixador  
 Norma / Especificação : NBR 5356

### Características do ambiente

Instalação : Ao tempo  
 Altitude máxima de instalação (m.s.n.m) : 1000.0  
 Atmosfera : Não agressiva  
 Temperatura máxima do ambiente (°C) : 40.0

### Características elétricas

Frequência (Hz): 60.0	Fases: Trifásico	Grupo de ligação: Dyn1
-----------------------	------------------	------------------------

Enrolamento	Potência (kVA)	Tensão (kV)	Ligaçao	Comutação
	ONAF			
Alta tensão	20000.0	138.0 +/x1.25%	Triângulo	CDC
Baixa Tensão		13.8	Estrela	

Elevação de temperatura dos enrolamentos média (°C)	65.0
Elevação de temperatura dos enrolamentos ponto mais quente (°C)	80.0
Classe do material isolante	E (120 °C)

Ensaios dieletéticos	Alta tensão		Baixa Tensão	
	Fase	Neutro	Fase	Neutro
Nível de isolamento (kV)	145.0		15.0	15.0
Tensão de impulso (pleno) (kV)	650.0		110.0	110.0
Tensão de impulso (cortado) (kV)	715.0		121.0	
Tensão aplicada (kV)	185.0		34.0	34.0
Tensão induzida (kV)	150 kV		2xVn	2xVn

Temperatura de Referência @ 85.0 °C - ONAF	100%
Perdas a vazio (kW)	22.0
Perdas em carga (kW)	
Perda Total (kW)	172.0
Corrente de excitação (%)	0.43

Alta/Baixa tensão	Base		Impedância @ 85.0 °C - ONAF (%)
	Posição (kV)	Potência (kVA)	
138.0 / 13.8		20000.0	12.5

Refrigeração	ONAF
Nível de ruído (dB)	75.0
Descargas parciais (pC)	300.0
Corrente de inrush (Apk)	
Fator K	K1

Fator de Carga [%]	Regulação (100% de carga)		
	ONAF (Φ = 0.8)	ONAF (Φ = 0.9)	ONAF (Φ = 1)
100	8.4	4.885	1.37

Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data
Executor				
Verificador				
Data	11/08/2025		Página 1 / 2	Revisão

**Figura 100 – Folha de dados do trasmformdor WEG**

**Fonte: (WEG Equipamentos Elétricos S.A. 2025).**