



**ESTUDO DE TRANSITÓRIOS  
ELETROMAGNÉTICOS EM REDE DE MÉDIA  
TENSÃO COM MODELAGEM REALISTA DE  
CARGAS E SEUS IMPACTOS NA  
QUALIDADE DE ENERGIA**

**RAPHAEL ALLEPH LEITÃO VASCONCELOS**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

Estudo de Transitórios Eletromagnéticos em Rede de Média Tensão  
com Modelagem Realista de Cargas e seus Impactos na Qualidade de  
Energia

Raphael Alleph Leitão Vasconcelos

TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADA POR:

---

Amauri Gutierrez Martins Britto, DSc (ENE-UnB)  
(Orientador)

---

Prof. Kleber Melo e Silva, DSc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

---

Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, DSc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

Brasília/DF, julho de 2023.

## FICHA CATALOGRÁFICA

VASCONCELOS, RAPHAEL ALLEPH LEITÃO

Estudo de Transitórios Eletromagnéticos em Rede de Média Tensão com Modelagem Realista de Cargas e seus Impactos na Qualidade de Energia. [Brasília/DF] 2023.

xiii, 77p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Trabalho de Graduação, 2023).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 1. Modelagem de carga realista  | 2. Qualidade de energia                      |
| 3. Transitórios eletromagnético | 4. Rede de distribuição de energia elétrica. |
| I. ENE/FT/UnB                   | II. Título (série)                           |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VASCONCELOS, R. A. L (2023). Estudo de Transitórios Eletromagnéticos em Rede de Média Tensão com Modelagem Realista de Cargas e seus Impactos na Qualidade de Energia. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2023, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 77p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Raphael Alleph Leitão Vasconcelos

TÍTULO: Estudo de Transitórios Eletromagnéticos em Rede de Média Tensão com Modelagem Realista de Cargas e seus Impactos na Qualidade de Energia.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Raphael Alleph Leitão Vasconcelos

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE)

CEP 70919-970 - Brasília - DF

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu chefe, orientador e amigo professor Amauri. Deixo aqui um agradecimento do fundo do meu coração por todo o apoio e ajuda quando eu não estava nos melhores momentos da minha vida. Obrigado por não desistir de mim, mesmo quando eu já não acreditava em mim mesmo, onde vários outros professores teriam me abandonado! Obrigado por todo o tempo que trabalhamos juntos, pelas oportunidades de monitoria e pela confiança ao me designar tarefas importantes. O caminho foi duro, árduo e nebuloso, mas no final de tudo, DEU CERTO! O senhor é um dos grandes responsáveis por eu ser a pessoa de hoje e de realmente despertar o interesse de me tornar um engenheiro eletricitista melhor a cada dia. Por todos os motivos aqui descritos e outros que não caberiam nesse TCC, agradeço novamente e digo a frase clássica "Sim, senhor!".

Agradeço aos meus pais, Joaquim e Renata, pelo apoio e paciência durante todos esses anos de universidade. Sou muito grato a todos ensinamentos e orientações que vocês me passaram.

Agradeço a todos os professores do ENE que participaram da minha jornada de graduação. Um agradecimento especial aos professores Fernando Cardoso e Francis por toda a ajuda e apoio na modelagem dos componentes aqui apresentados.

Agradeço a todos meus amigos de longa data, dentre eles: Luan, Darione, João Paulo, Caio. Obrigado por todo incentivo e momentos de descontração ao longo dessa jornada.

Um agradecimento ESPECIAL ao meu grande amigo RODRIGO NUNES, obrigado por toda a ajuda e por ser esse cara incrível que eu admiro, você é de longe uma das pessoas mais inteligentes que conheço! Já temos uma amizade longa e que venham muitos outros anos pela frente!

Agradeço a todos os amigos que fiz na faculdade! Em especial os dois grandes companheiros ao longo do curso Rubens Braz e Matheus Noschang, sem vocês eu não estaria no final do curso! Apesar de os dois estarem no exterior, ainda vamos nos encontrar várias vezes!!!

Um agradecimento especial também a um grande amigo que fiz no final do curso Antônio

César! Você é um engenheiro e amigo de ponta! E é uma das pessoas mais inteligentes e trabalhadoras que já conheci! Tenho uma grande admiração por ti e espero que trabalhemos e cresçamos juntos

Agradeço à Verinha do ENE! a grande formadora de engenheiros do departamento!

Agradeço aos 4 estágios que tive a oportunidade de trabalhar durante a faculdade, todas as experiências e dicas profissionais que me ajudaram a me tornar um engenheiro que a cada dia procura novos conhecimentos.

E um grande a todos os outros amigos e colegas que não pude citar nesse documento, a presença de vocês foi essencial para me tornar o que sou hoje!

## RESUMO

Neste trabalho, é realizado uma análise de comparação, para diversos cenários de carregamento ao longo do dia, de um modelo realista de cargas modeladas a componente com um modelo de cargas lineares quando submetidos a diversos distúrbios comuns à rede elétrica de distribuição de média tensão. O objetivo principal é analisar, durante condições de distúrbio, as diferenças nas respostas transitórias dos modelos de carga implementados e seus respectivos impactos na qualidade de energia fornecida ao consumidor final, investigando o nexo de causalidade entre distúrbios eletromagnéticos e possíveis danos a equipamentos eletrônicos. Por meio do software EMTP (*“Electromagnetic Transients Program”*), modelam-se de maneira realista um ramal de distribuição da Neoenergia em Brasília e um condomínio residencial. Apresentam-se todas as considerações e parâmetros utilizados em todas as etapas de modelagem assim como a localização dos distúrbios implementados. Posteriormente, avaliam-se os piores cenários para cada distúrbio, relacionando-os com os limites de tensão definidos pela agência reguladora ANEEL e, também, com a curva ITIC, a qual define limites de tolerância para equipamentos eletrônicos. Por fim, constata-se todas as diferenças observadas entre os modelos estudados e indicam-se todos os casos em que se superam os limites de tensão definidos pela ANEEL e as regiões da curva ITIC em que o condomínio se encontra durante uma condição de distúrbio.

**Palavras-chave:** Modelagem de carga realista, transitórios eletromagnéticos, distúrbios elétricos, qualidade de energia, nexo de causalidade, sobretensões, sobrecorrentes, rede de distribuição de energia elétrica.

## ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis of a realistic detailed component-based load model with a linear load model under different loading scenarios throughout the day. The study investigates their responses to common disturbances found in medium-voltage distribution networks. The main objective is to analyze, during disturbance conditions, the differences in transient responses of the implemented load models and their respective impacts on the quality of energy supplied to the end consumer, investigating the causal relationship between electromagnetic disturbances and potential damage to electronic equipment. . Using the EMTP (Electromagnetic Transients Program) software, a realistic distribution feeder from Neoenergia in Brasília and a residential condominium were modeled. All considerations and parameters utilized in the modeling process, as well as the implemented disturbance locations, are detailed. Subsequently, worst-case scenarios are evaluated for each disturbance, relating them to the voltage limits defined by the regulatory agency ANEEL and also to the ITIC curve, which defines tolerance limits for electronic equipment. Finally, all observed differences between the studied models are documented, highlighting the cases where the voltage limits defined by ANEEL are exceeded, and the regions of the ITIC curve where the condominium is positioned during a disturbance condition.

**Keywords:** Realistic load modeling, electromagnetic transients, electrical disturbances, power quality, causal relationship, overvoltages, overcurrents, electrical distribution network.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de figuras</b>	iv
<b>Lista de tabelas</b>	vii
<b>Lista de símbolos</b>	ix
<b>Glossário</b>	xi
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização e justificativa do tema . . . . .	1
1.2 Objetivo . . . . .	2
1.2.1 Objetivos específicos . . . . .	2
1.3 Metodologia . . . . .	3
1.4 Estrutura do trabalho . . . . .	4
<b>Capítulo 2 – Fundamentos teóricos</b>	6
2.1 Modelos de carga . . . . .	6
2.1.1 Modelos clássicos de carga estática . . . . .	6
2.1.2 Modelo de carga linear . . . . .	7
2.2 Distúrbios em sistemas de distribuição . . . . .	8
2.2.1 Falhas no sistema elétrico . . . . .	9
2.2.2 Surto de religamento . . . . .	9
2.2.3 Surto de comutação . . . . .	9
2.2.4 Descargas atmosféricas . . . . .	9
2.3 Curva ITIC . . . . .	10
2.4 Sobretensão e sobrecorrente . . . . .	12
2.4.1 Limites toleráveis pela agência reguladora . . . . .	12
<b>Capítulo 3 – Implementação dos modelos orientados a componente</b>	13

3.1	Modelo de elementos resistivos . . . . .	13
3.2	Modelo de cargas eletrônicas com potência DC . . . . .	13
3.2.1	Circuito equivalente . . . . .	13
3.2.2	Implementação do modelo SMPS no EMTP . . . . .	15
3.2.3	Validação do modelo SMPS . . . . .	16
3.3	Modelo de lâmpadas fluorescentes . . . . .	17
3.3.1	Circuito equivalente . . . . .	18
3.3.2	Implementação do modelo CFL no EMTP . . . . .	19
3.3.3	Validação . . . . .	20
3.4	Modelo de lâmpadas LED . . . . .	21
3.4.1	Circuito equivalente . . . . .	21
3.4.2	Implementação do modelo LED no EMTP . . . . .	23
3.4.3	Validação . . . . .	24
3.5	Modelo de motores monofásicos . . . . .	25
3.5.1	Implementação de motores monofásicos no EMTP . . . . .	25
3.6	Modelo de motores trifásicos . . . . .	27
3.6.1	Implementação de motores trifásicos no EMTP . . . . .	27
<b>Capítulo 4 – Unidade consumidora modelada a componente</b>		<b>29</b>
4.1	Procedimentos para a junção dos modelos em uma unidade consumidora . . . . .	29
4.2	Código máscara para controle dos modelos do bloco UC . . . . .	31
4.2.1	Código máscara para os elementos resistivos . . . . .	31
4.2.2	Código máscara para cargas eletrônicas com potência DC . . . . .	32
4.2.3	Código máscara cargas de lâmpadas fluorescentes . . . . .	33
4.2.4	Código máscara cargas de lâmpadas LED . . . . .	34
4.2.5	Código máscara para motores monofásicos . . . . .	36
4.2.6	Código máscara para motores trifásicos . . . . .	37
<b>Capítulo 5 – Estudo de caso</b>		<b>38</b>
5.1	Descrição geral do sistema de distribuição . . . . .	38
5.2	Descrição geral do condomínio . . . . .	40
5.3	Cenários de carregamento . . . . .	41
5.4	Análise de distúrbios na rede elétrica . . . . .	43
5.4.1	Ocorrência de curtos-circuitos . . . . .	44
5.4.1.1	Análise de resultados . . . . .	45
5.4.2	Surtos de religamento . . . . .	49
5.4.2.1	Análise de resultados . . . . .	50

---

5.4.3	Chaveamento de banco de capacitores . . . . .	54
5.4.3.1	Análise de resultados . . . . .	55
5.4.4	Descargas atmosféricas . . . . .	57
5.4.4.1	Análise de resultados . . . . .	58
5.4.5	Resumo de resultados . . . . .	63
<b>Capítulo 6 – Conclusão e trabalhos Futuros</b>		<b>65</b>
<b>Referências</b>		<b>68</b>
<b>Anexo A - Lista de tabelas para o carregamento Manhã</b>		<b>70</b>
<b>Anexo B - Lista de tabelas para o carregamento Tarde</b>		<b>72</b>
<b>Anexo C - Lista de tabelas para o carregamento Noite</b>		<b>74</b>
<b>Anexo D - Lista de tabelas para o carregamento Indutivo</b>		<b>76</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Circuito para carga PQ. . . . .	8
2.2	Forma de onda para descarga atmosférica 8/20 $\mu$ s. . . . .	10
2.3	Curva ITIC. . . . .	11
3.1	Circuito equivalente para cargas SMPS. . . . .	14
3.2	Circuito equivalente para cargas SMPS no EMTP. . . . .	15
3.3	Esquemático utilizado para validação dos modelos. . . . .	16
3.4	Relações P-V e Q-V nos terminais da carga SMPS do modelo implementado. . .	17
3.5	Circuito equivalente para cargas CFL. . . . .	18
3.6	Circuito equivalente para cargas CFL no EMTP. . . . .	19
3.7	Relações P-V e Q-V nos terminais da carga CFL do modelo implementado. . . .	21
3.8	Circuito equivalente para cargas LED. . . . .	22
3.9	Representação linear para um conjunto de LEDs. . . . .	22
3.10	Circuito equivalente para cargas LED no EMTP. . . . .	23
3.11	Relações P-V e Q-V nos terminais da carga LED. . . . .	25
3.12	Circuito exemplo para partida de motor monofásico no EMTP. . . . .	26
3.13	Circuito monofásico de chaveamento de motores de 0,25 hp. . . . .	27
3.14	Circuito para motor de indução trifásico. . . . .	28
4.1	Criação de bloco trifásico com modelos monofásicos. . . . .	29
4.2	Criação de bloco para Unidade Consumidora - “UC”. . . . .	30

5.1	Rede de distribuição de Brasília em estudo (ramal 1004). . . . .	38
5.2	Rede de distribuição implementada no <i>software</i> EMTP. . . . .	39
5.3	Modelo do condomínio residencial em estudo. . . . .	40
5.4	Modelo dos condutores trifásicos do condomínio em estudo. . . . .	41
5.5	Mapa chave do local dos distúrbios no condomínio. . . . .	43
5.6	Mapa chave do local dos distúrbios no ramal 1004. . . . .	44
5.7	Esquema montado para estudo de curto-circuito. . . . .	45
5.8	Tensão na fase em curto do QGBT. . . . .	46
5.9	Tensão de alimentação da fase C nas unidades consumidoras. . . . .	46
5.10	Contribuição de corrente ao ramo de falta proveniente da rede. . . . .	47
5.11	Contribuição de corrente ao ramo de falta proveniente das unidades consumidoras. . . . .	47
5.12	Contribuição de corrente ao ramo de falta das unidades consumidoras, durante curto. . . . .	48
5.13	Esquema montado para estudo de religamento do transformador. . . . .	49
5.14	Tensão de alimentação das unidades consumidoras no surto de religamento. . . . .	50
5.15	Tensão $V_{rms}$ na fase C do quadro QGBT. . . . .	51
5.16	Correntes das unidades consumidoras no surto de religamento. . . . .	52
5.17	Tensão de alimentação das unidades consumidoras no momento do chaveamento capacitivo. . . . .	52
5.18	Correntes das unidades consumidoras no momento do chaveamento capacitivo. . . . .	53
5.19	Bloco trifásico de capacitores para correção do fator de potência. . . . .	54
5.20	Circuito trifásico implementado pelo bloco “BANCO CAPACIT”. . . . .	55
5.21	Correntes das unidades consumidoras no momento do chaveamento capacitivo. . . . .	56
5.22	Tensão de alimentação das unidades consumidoras no momento do chaveamento capacitivo. . . . .	56
5.23	Esquema montado para estudo com descargas atmosféricas. . . . .	58

---

5.24	Esquema montado para proteção de sobrecorrentes no modelo de descargas atmosféricas. . . . .	58
5.25	Tensão de alimentação de mesma fase a qual a descarga atmosférica é introduzida, fase A. . . . .	59
5.26	Tensão de alimentação da fase C nas unidades consumidoras. . . . .	60
5.27	Tensão na fase A no instante de atuação da proteção. . . . .	60
5.28	Corrente de alimentação da fase C. . . . .	61
5.29	Tensão na fase A no instante da atuação da proteção. . . . .	61
5.30	Tensão na fase C caso a instalação não possua o elemento de proteção contra descargas atmosféricas. . . . .	63

## LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros elétricos considerados para motores trifásicos. . . . .	28
5.1	Declaração de carga para cada apartamento. . . . .	42
5.2	Declaração de carga para quadro da área comum (UC_COM). . . . .	42
5.3	Declaração de carga dos motores trifásicos da área comum (UC_COM). . . . .	42
5.4	Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão no QGBT dos modelos em estudo no cenário Tarde. . . . .	49
5.5	Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão no quadro UC_COM dos modelos em estudo no cenário Tarde. . . . .	49
5.6	Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão dos modelos em estudo no cenário Tarde. . . . .	54
5.7	Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão nos modelos em estudo no cenário Indutivo. . . . .	57
5.8	Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão com descargas atmosféricas no ramal, durante o cenário Tarde. . . . .	62
5.9	Tabela resumo de resultados . . . . .	64
1	Equipamentos em operação nos apartamentos (“UC1-UC12”). . . . .	70
2	Relação entre potência demandada e potência instalada nos apartamentos (“UC1-UC12”). . . . .	70
3	Equipamentos em operação na área comum (“UC_COM”). . . . .	71
4	Motores trifásicos na área comum (UC_COM). . . . .	71
5	Relação entre potência demandada e potência instalada na área comum (“UC_COM”). . . . .	71

---

6	Demanda de motores trifásicos de (UC_COM) em operação. . . . .	71
7	Equipamentos em operação nos apartamentos (“UC1-UC12”). . . . .	72
8	Relação entre potência demandada e potência instalada nos apartamentos (“UC1-UC12”). . . . .	72
9	Equipamentos em operação na área comum (“UC_COM”). . . . .	72
10	Motores trifásicos na área comum (“UC_COM”). . . . .	73
11	Relação entre potência demandada e potência instalada na área comum (“UC_COM”).	73
12	Demanda de motores trifásicos de (UC_COM) em operação. . . . .	73
13	Equipamentos em operação nos apartamentos (“UC1-UC12”). . . . .	74
14	Relação entre potência demandada e potência instalada nos apartamentos (“UC1-UC12”). . . . .	74
15	Equipamentos em operação na área comum (“UC_COM”). . . . .	75
16	Motores trifásicos de (“UC_COM”) em operação. . . . .	75
17	Relação entre potência demandada e potência instalada na área comum (“UC_COM”).	75
18	Demanda de motores trifásicos de (“UC_COM”) em operação. . . . .	75
19	Equipamentos em operação nos apartamentos (“UC1-UC12”). . . . .	76
20	Relação entre potência demandada e potência instalada nos apartamentos (“UC1-UC12”). . . . .	76
21	Equipamentos em operação na área comum (“UC_COM”). . . . .	77
22	Motores trifásicos de (“UC_COM”) em operação. . . . .	77
23	Relação entre potência demandada e potência instalada na área comum (“UC_COM”).	77
24	Demanda de motores trifásicos de (“UC_COM”) em operação. . . . .	77

## LIST OF SYMBOLS

$\alpha$	Coeficiente que determina o tempo de subida de descarga atmosférica
$\beta$	Coeficiente que determina o tempo de descida de descarga atmosférica
$\tau$	Menor atraso de propagação em um modelo de linha
$A$	Coeficiente de correção para a magnitude da descarga atmosférica
$C_{dc}$	Capacitor do circuito DC
$C_{ref1}$	Capacitor de referência 1
$C_{ref2}$	Capacitor de referência 2
$D$	Ciclo de trabalho do conversor <i>flyback</i>
$f$	Frequência medida no ponto de conexão
$f_0$	Frequência nominal da carga
$flag$	Variável que controla a ativação dos circuitos no modelo implementado
$I_l$	Amplitude da descarga atmosférica
$k_q$	Sensibilidade da potência reativa com relação à frequência
$k_p$	Sensibilidade da potência ativa com relação à frequência
$L_{dc}$	Indutor no circuito DC com função de PFC
$n$	Relação de transformação no conversor <i>flyback</i>
$n_q$	Sensibilidade da potência reativa com relação à tensão
$n_p$	Sensibilidade da potência ativa com relação à tensão
$P$	Potência ativa demandada
$P_0$	Potência ativa nominal

---

$Q$	Potência reativa demandada
$Q_0$	Potência reativa nominal
$R_{eq}$	Bloco que implementa a resistência equivalente
$R_{nonlinear}$	Resistência não linear
$S$	Potência aparente medida
$S_{Discharg}$	Chave que implementa admitância equivalente no descarregamento do capacitor
$S_{Charg}$	Chave que implementa admitância equivalente no carregamento do capacitor
$V$	Tensão medida no ponto de conexão
$V_0$	Tensão nominal da carga
$V_{Cdc1}$	Tensão no primeiro capacitor DC
$V_{Cdc2}$	Tensão no segundo capacitor DC
$V_{medido}$	Tensão medida a ser comparada ao valor referência definido pela ANEEL.
$V_{rms_{critico}}$	Tensão referência que define as regiões críticas e precária, dado por ANEEL
$X_{Cdc}$	Reatância do capacitor no circuito DC
$X_{Ldc}$	Reatância do indutor no circuito DC
$Y_{eq}$	Bloco que implementa a admitância equivalente
$Y_{Discharg}$	Admitância equivalente no descarregamento do capacitor
$Y_{Charg}$	Admitância equivalente no carregamento do capacitor

## GLOSSÁRIO

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CA	Corrente alternada
CFL	<i>Compact Fluorescent Lamps</i>
DC	<i>Direct Current</i>
<i>DCE_BAIXA</i>	<i>Software</i> do fabricante Prysmian
<i>ELEVATOR_3PH</i>	Bloco de elevador para motor trifásico
EMT	<i>Electromagnetic Transients</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
EPROTENAX	Condutor de baixa tensão com isolamento EPR
<i>Flyback</i>	Conversor DC-DC utilizado
<i>Hold-up time</i>	Tempo que o capacitor mantém a tensão, caso haja desligamento
<i>ILUM_CFL</i>	Bloco trifásico no modelo implementado para lâmpadas fluorescentes
<i>ILUM_LED</i>	Bloco trifásico no modelo implementado para lâmpadas LED
ITIC	Curva que define limites de tolerância para equipamentos eletrônicos
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
<i>MOTOR_MONO</i>	Bloco trifásico no modelo implementado para motores monofásicos
PFC	<i>Power Factor Correction</i>
PQ	Modelo de carga linear implementado

---

PRODIST	Proc. de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
<i>Protege_raio</i>	Bloco implementado para proteção contra sobretensões
<i>PUMP_3PH</i>	Bloco de bomba d'água para motor trifásico
QGBT	Quadro geral de baixa tensão
<i>RES_COOKING</i>	Bloco trifásico de elementos resistivos para fins culinários
<i>RES_SP_HEAT</i>	Bloco trifásico de elementos resistivos para aquecimentos gerais
<i>RES_WT_HEAT</i>	Bloco trifásico de elementos resistivos para aquecimento de água
SMPS	<i>Switch-mode power supplies</i>
<i>SMPS_PC</i>	Bloco trifásico no modelo implementado para computadores
<i>SMPS_TV</i>	Bloco trifásico no modelo implementado para televisores
<i>Speed_per_cent</i>	Bloco que controla a velocidade do motor trifásico no tempo
<i>Speed_RPM</i>	Bloco que transforma a velocidade percentual do motor trifásico em RPM
<i>Speed_rads</i>	Bloco que transforma a velocidade RPM do motor trifásico em rad/s
UCx	x-ésima unidade consumidora
<i>UC_COM</i>	Unidade consumidora da área comum
UnB	Universidade de Brasília

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

Sistemas elétricos de potência possuem a função de fornecer energia elétrica com qualidade e segurança. Sistemas de distribuição têm sua dinâmica bastante influenciada pelos tipos de carga conectadas aos mesmos. Portanto, algumas simplificações e suposições na modelagem de cargas elétricas podem não contemplar a real dinâmica de sistemas de distribuição e seus impactos na qualidade de energia fornecida ao consumidor final, principalmente na análise de transitórios eletromagnéticos (BRITTO, 2020). Nesse contexto, mostra-se a importância de uma modelagem de carga elétrica mais realista.

Transitórios eletromagnéticos são fenômenos ou respostas elétricas originárias de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema elétrico, até o sistema retornar ao regime permanente de operação (JÚNIOR, 2003). Transitórios eletromagnéticos podem gerar sobretensões, sobrecorrentes ou afundamentos de tensão, que impactam diretamente a qualidade de energia entregue ao consumidor, podendo causar danos ou mau funcionamento de equipamentos em uma unidade consumidora.

É responsabilidade da concessionária de energia atender aos limites da qualidade de energia definidos pela agência reguladora ANEEL no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2017a). Caso haja dano a um equipamento do consumidor devido a alguma perturbação do sistema elétrico, a concessionária deve seguir os procedimentos descritos no módulo 9 do PRODIST (ANEEL, 2017b). Se comprovado nexo de causalidade, caracterizado pelo vínculo entre o evento causador e o dano reclamado, a concessionária deve ressarcir o consumidor pelo dano causado ao seu equipamento.

As modelagens realistas de proteções assim como sistemas elétricos de potência são am-

plamente estudadas na literatura, como apresentas em (BREDA *et al.*, 2009) (BRITTO, 2020), porém não há estudos consolidados que abordem uma modelagem realista simultânea de todos os componentes que integram um sistema de distribuição. Neste âmbito, fica evidente a importância de uma modelagem realista de cargas elétricas conectadas a um sistema realista de distribuição, de forma a se investigar onexo de causalidade de um distúrbio elétrico na rede de distribuição e o dano causado a um equipamento do consumidor.

## 1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo comparar, no domínio do tempo, em diferentes cenários de carregamento ao longo do dia, as diferentes respostas transitórias provocadas por distúrbios elétricos em um sistema de distribuição residencial, utilizando um modelo realista de carga elétrica e um modelo de carga linear, amplamente utilizado em simulações de sistemas elétricos. Dessa forma, espera-se identificar semelhanças e diferenças durante distúrbios elétricos e quais os impactos das diferentes estratégias de modelagem das cargas nas respostas em corrente e tensão transitórias. Por fim, constatam-se os casos em que distúrbios elétricos possam danificar ou causar mau funcionamento a equipamentos eletrônicos, devido à ocorrência de variações de tensão de curta duração (VTCD) com potencial danoso, nos modelos realistas a componente e nos modelos de cargas lineares.

### 1.2.1 Objetivos específicos

De modo a se atingir os objetivos citados, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Implementar e validar os diferentes tipos de componentes presentes em uma unidade consumidora residencial no *software* EMTP (“*Electromagnetic Transients Program*”);
- Construir um modelo realista a componente de uma unidade consumidora, agregando os diferentes componentes de uma carga residencial trifásica;
- Modelar de forma realista no EMTP um ramal de distribuição real da Neoenergia;
- Modelar de forma realista no EMTP um condomínio residencial com valores reais de

resistências e reatâncias CA dos condutores da instalação;

- Criar cenários de carregamento ao longo do dia, de forma a se analisar os efeitos de distúrbios em diferentes níveis de demanda;
- Identificar os casos em que as sobretensões superam os limites estabelecidos pela agência reguladora.

### 1.3 METODOLOGIA

Com o objetivo de se criar um modelo mais realista de cargas elétricas residenciais, escolheu-se a abordagem desenvolvida em (MILANI *et al.*, 2022), que consiste em agregar modelos EMT (“*Electromagnetic Transients*”) de diferentes tipos de componentes presentes em cargas residenciais. Os modelos EMT são baseados nos circuitos equivalentes de cada tipo de carga, com seus parâmetros dados por unidade, representam a operação de um conjunto de equipamentos do mesmo tipo. Os modelos EMT implementados no *software* EMTP representam a operação conjunta de equipamentos dos tipos: elementos resistivos, equipamentos eletrônicos, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas LED e motores trifásicos.

Devido à diferença entre versões do *software* EMTP utilizadas no presente trabalho e em (MILANI *et al.*, 2022), o modelo de motores monofásicos não segue a mesma metodologia aplicada aos outros tipos de componente da carga residencial, em que um circuito EMT equivalente representa a operação de um conjunto de equipamentos do mesmo tipo. A razão disso é que a versão utilizada neste trabalho não possui a opção de se desligar o enrolamento auxiliar da máquina “*Double phase induction motor*”, utilizada na modelagem de motores monofásicos, assim como feito em (MILANI *et al.*, 2022), dessa maneira, não foi possível validar o modelo apenas com os valores por unidade do enrolamento principal apresentados em (MILANI *et al.*, 2022). Como solução, implementa-se um modelo que controla o chaveamento de vários circuitos validados de motores monofásicos com potência de 0,25 hp, a fim de se representar as contribuições de carga de motores monofásicos residenciais. O circuito do motor monofásico validado está disponível na Seção de exemplos do *software* EMTP.

A modelagem realista do ramal de distribuição é feita por meio da transposição do modelo implementado em (TOLEDO, 2019) no *software* ATP (“*Alternative Transients Program*”) para

o *software* EMTP. O modelo a componente implementado possui partida de motores, então é necessário um tempo maior de simulação para que o modelo atinja o regime permanente, região que representa o estado normal de operação do sistema elétrico quando da ocorrência dos distúrbios analisados. A representação do ramal no *software* ATP utiliza o modelo de linha com parâmetros constantes do EMTP. Devido ao tempo necessário para o modelo atingir o regime permanente e evitar longos tempos de simulação é necessária a alteração de alguns comprimentos das linhas do ramal implementado em (TOLEDO, 2019). Aumentaram-se as tensões de linha fornecidas pelas fontes de tensão de maneira que o ponto de entrega do transformador do condomínio seja  $380/220 V_{rms}$ .

A modelagem realista do condomínio foi realizada com auxílio do *software* DCE-Prysmian, de maneira a se determinar todas as seções dos condutores, resistências CA e reatâncias CA dos condutores da instalação. Para os condutores no interior da instalação, simularam-se o método de instalação B1 descrito na norma NBR-5410 (ABNT, 2004), consiste na instalação de condutores unipolares em eletroduto circular embutido na alvenaria. Já os condutores entre o secundário do transformador e o quadro geral QGBT, simulou-se o método de instalação D da norma NBR-5410 (ABNT, 2004), o qual utiliza condutores unipolares em eletroduto enterrado.

Por fim, para a análise dos distúrbios implementados em cada cenário de carga, observam-se as respostas das grandezas elétricas de tensão e corrente no tempo e os valores de sobretensão e sobrecorrentes percentuais em relação à operação em regime permanente.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente Capítulo 1 apresenta a contextualização, objetivos e estrutura geral deste trabalho.

No início do Capítulo 2, descrevem-se os modelos clássicos utilizados na modelagem de cargas elétricas e o modelo de carga linear implementado. Em seguida, caracterizam-se os distúrbios mais comuns em redes de distribuição de média tensão. Por fim, apresenta-se a curva ITIC e os limites de tensão definidos pela agência reguladora ANEEL.

Em seguida, no Capítulo 3, detalha-se a implementação dos diferentes tipos de componente integrantes do modelo realista para uma carga residencial, e relacionam-se os equipamentos

elétricos residenciais aos componentes modelados na carga realista.

Posteriormente, o Capítulo 4 apresenta os procedimentos para agregar os componentes modelados no Capítulo 3, de forma a se construir uma unidade consumidora residencial realista. Com esse propósito, detalha-se todos parâmetros e código máscara utilizados para controle da unidade consumidora realista.

No Capítulo 5, retrata-se um estudo de caso em que um condomínio é alimentado por um ramal de distribuição real da cidade de Brasília. Neste capítulo, explicam-se os procedimentos adotados para o dimensionamento realista do condomínio em estudo, utilizando o *software* DCE-Prysmian, e os procedimentos adotados para a transposição do ramal de distribuição de média tensão do *software* ATP para o *software* EMTP. Caracterizam-se quatro cenários de carregamento para cada unidade consumidora do condomínio a fim de se investigar a diferença das respostas transitórias a distúrbios elétricos ao longo do dia para o modelo de cargas lineares e para o modelo realista de carga implementado. Enfim, apresentam-se as estratégias utilizadas na aplicação dos distúrbios ao longo do condomínio e do ramal alimentador.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e propostas para futuros trabalhos.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 MODELOS DE CARGA

#### 2.1.1 Modelos clássicos de carga estática

A abordagem de um modelo de carga estática é representar as potências ativa e reativa de uma carga elétrica por uma relação algébrica em função da tensão e frequência, independente do tempo. Dessa forma, são modelos apropriados para representar cargas que respondem instantaneamente às variações de tensão e frequência. Existem diversos modelos de cargas estáticas apresentadas em (ZHU, 2020), podendo citar: modelo exponencial, modelo com impedância constante, modelo com corrente constante e modelo com potências constantes.

**Modelo de carga exponencial:** Potências ativa e reativa demandadas são definidas como equações exponenciais dependentes da magnitude da tensão e frequência, dadas pelas Equações 2.1 e 2.2:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{k_p} \quad (2.1)$$

e

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{k_q} \quad (2.2)$$

de forma que  $P$ ,  $Q$ ,  $V$  e  $f$  representam, respectivamente, potência ativa, potência reativa, tensão e frequência medidas no ponto de conexão da carga. Analogamente,  $P_0$ ,  $Q_0$ ,  $V_0$  e  $f_0$  representam os valores nominais de potência ativa, potência reativa, tensão e frequência.

Os expoentes  $n_p$ ,  $n_q$ ,  $k_p$  e  $k_q$  definem a relação das potências ativa e reativa demandadas com a tensão e frequência de alimentação. Alteram-se os valores dos expoentes a fim de se obter as características da carga desejada. Devido às baixas variações de frequência em regime

permanente, a dependência de cargas estáticas a variações de frequência é geralmente negligenciada. Por essa razão, o termo de dependência da frequência das Equações 2.1 e 2.2 pode ser substituído pela sua expansão em série de Taylor, representado nas Equações 2.3 e 2.4:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_p} [1 - k_p(f - f_0)] \quad (2.3)$$

e

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_q} [1 - k_q(f - f_0)] \quad (2.4)$$

Apresentou-se em (RIBEIRO; LANGE, 1982) que os parâmetros  $n_p$  e  $n_q$  representam a sensibilidade das potências ativa e reativa com relação à tensão. De forma que os expoentes  $n_p$  e  $n_q$  podem ser obtidos por meio das derivadas parciais das Equações 2.3 e 2.4 em relação à tensão.

**Modelo de carga de potência constante:** Potências ativa e reativa são constantes, independentemente de variações na magnitude da tensão. As características da carga podem ser representadas ao escolher 0 nos expoentes das Equações 2.1 e 2.2 do modelo exponencial.

**Modelo de carga de corrente constante:** Potências ativa e reativa variam linearmente a variações na magnitude da tensão. As características da carga podem ser representadas ao escolher 1 nos expoentes das Equações 2.1 e 2.2 do modelo exponencial.

**Modelo de carga de impedância constante:** Potências ativa e reativa variam proporcionalmente ao quadrado das variações na magnitude da tensão. As características da carga podem ser representadas ao escolher 2 nos expoentes das Equações 2.1 e 2.2 do modelo exponencial.

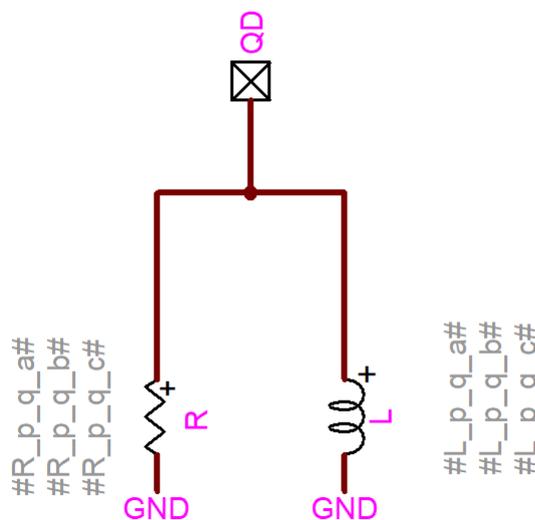
Com o objetivo de validar as modelagens do Capítulo 3, calcularam-se os valores  $n_p$  e  $n_q$  para cada componente e compararam-se aos valores  $n_p$  e  $n_q$  referência para cada componente.

### 2.1.2 Modelo de carga linear

O modelo de carga linear com impedância constante é amplamente utilizado para descrever características de consumo de uma carga elétrica (ALMEIDA; FREITAS, 1995). Neste trabalho,

o modelo de carga linear trifásico implementado possui um arranjo em estrela (Y) de forma que para cada fase haja uma resistência em paralelo com um indutor, a Figura 2.1 representa o modelo linear implementado no *software* EMTP. Nos próximos Capítulos, o modelo de carga linear é referenciado como modelo PQ.

**Figura 2.1.** Circuito para carga PQ.



**Fonte:** autoria própria.

Os valores de resistência e indutância por fase foram calculados em código máscara do EMTP de forma a consumir as mesmas potências ativa e reativa em regime permanente do modelo a componente criado no Capítulo 4.

## 2.2 DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A rede de distribuição de energia elétrica é responsável por transportar a energia gerada em usinas para os consumidores finais. No entanto, essa rede é suscetível a vários problemas que podem afetar a qualidade de energia entregue ao consumidor final, caracterizando um distúrbio elétrico (MARTINHO, 2009). Os distúrbios elétricos produzem características transitórias de elevação ou afundamento de grandezas elétricas, que a depender de sua duração e intensidade, podem ser capazes de danificar equipamentos do consumidor. Alguns distúrbios elétricos comuns à rede de distribuição de média tensão são curtos-circuitos, surtos de religamento, surtos de comutação e descargas atmosféricas.

### 2.2.1 Faltas no sistema elétrico

Os distúrbios de curtos-circuitos são caracterizados pelo contato de condutores sob potenciais diferentes (SATO; FREITAS, 2015). Tal contato pode ser direto (curto-circuito franco) ou indireto (por meio de arco voltaico). As principais causas de curtos-circuitos em redes de distribuição são: falhas em cadeias de isoladores, ação do vento, queda de árvores sobre linhas aéreas e ações de animais em equipamentos do sistema. O presente trabalho utiliza faltas monofásicas, pois são possuem a maior ocorrência nos sistemas de distribuição.

### 2.2.2 Surtos de religamento

Os distúrbios de religamento acontecem ao realizar manobras de reenergização de uma rede desenergizada. Este trabalho utiliza o religamento do transformador nos enrolamentos primário e secundário a fim de investigar os efeitos da reenergização aos consumidores finais.

### 2.2.3 Surtos de comutação

A prática de correção do fator de potência é comum em instalações que possuam esse parâmetro abaixo dos estabelecidos pela concessionária de energia. Como a maioria das instalações fora desses limites possuem caráter indutivo, faz-se necessário o chaveamento de banco de capacitores, geralmente no quadro principal, a fim de se aumentar o fator de potência para os limites estabelecidos. Essa comutação de capacitores produzem distúrbios transitórios nos parâmetros elétricos. O presente trabalho utilizou um banco de capacitores programáveis conectados ao quadro geral QGBT.

### 2.2.4 Descargas atmosféricas

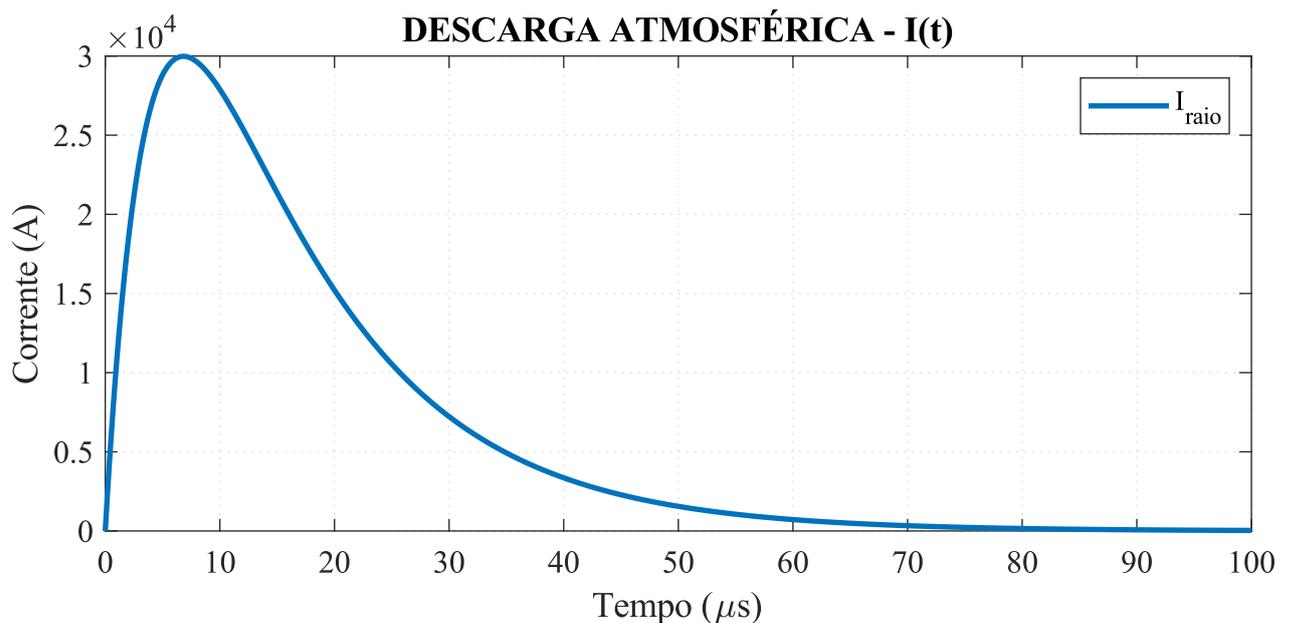
Descargas atmosféricas são distúrbios típicos em redes de distribuição aéreas, capazes de gerar sobretensões e sobrecorrentes elevadas. Tipicamente, modelam-se descargas atmosféricas com o modelo de exponencial dupla, descrito na Equação 2.5:

$$i(t) = A I_l (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad (2.5)$$

de forma que  $A$  é coeficiente de correção para a magnitude,  $I_l$  é a amplitude da descarga atmosférica,  $\alpha$  é o coeficiente que determina o tempo de subida e  $\beta$  é o coeficiente que determina o tempo de descida do pulso do raio.

O presente trabalho utilizou a forma de onda típica de uma descarga atmosférica 8/20  $\mu\text{s}$ , representada na Figura 2.2. Os parâmetros que a descrevem são  $\alpha = 7,714 \times 10^4$ ,  $\beta = 2,49 \times 10^5$ ,  $A = 2,331$  e  $I_l = 30 \text{ kA}$ , dados em (LUO *et al.*, 2018).

**Figura 2.2.** Forma de onda para descarga atmosférica 8/20  $\mu\text{s}$ .

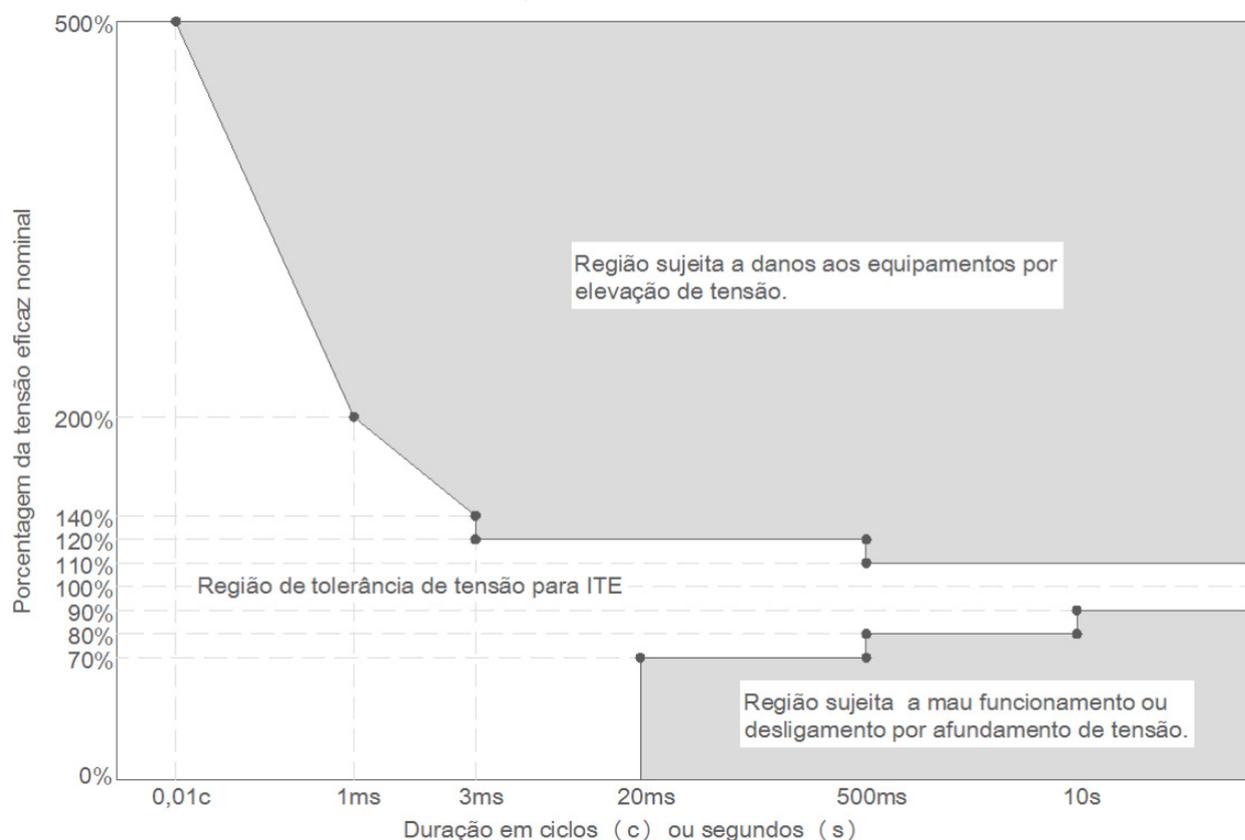


**Fonte:** autoria própria.

## 2.3 CURVA ITIC

A curva ITIC, Figura 2.3, define limites de tolerância para equipamentos eletrônicos e computadores relacionados à tecnologia da informação (TI).

Figura 2.3. Curva ITIC.



Fonte: (HONRUBIA-ESCRIBANO *et al.*, 2012).

Na Figura 2.3, é possível distinguir três regiões principais, sendo elas:

- Região de imunidade, onde não há possibilidade de falhas ou danos a equipamentos elétricos;
- Região de susceptibilidade por sobretensões, com possibilidade de ruptura da isolação dos equipamentos, devido a sobretensões transitórias ou elevações de tensão;
- Região de susceptibilidade por afundamentos de tensão, com possibilidade mau funcionamento ou parada de operação de equipamentos, devido à ocorrência de afundamentos de tensão ou interrupções momentâneas.

## 2.4 SOBRETENSÃO E SOBRECORRENTE

Sobretensão e sobrecorrente são definidas como pulsos ou ondas de tensão ou corrente que se sobrepõe à tensão ou à corrente nominal do equipamento. O presente trabalho analisa as sobretensões e sobrecorrentes de maneira percentual em relação aos valores nominais.

### 2.4.1 Limites toleráveis pela agência reguladora

A agência reguladora ANEEL define faixas de classificação de tensão em regime permanente para catalogar o fornecimento de energia como adequado, precário ou crítico. A Tabela 5 apresentada no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017a), define os limites em  $V_{rms}$  para pontos de conexão com tensão inferior a 2,3 kV no sistema 380/220  $V_{rms}$ . O valor da tensão de atendimento é referido como  $V_{medido}$ .

- **Adequado:**  $202 \leq V_{medido} \leq 231$ ;
- **Precário:**  $191 \leq V_{medido} < 202$  ou  $231 < V_{medido} \leq 233$ ;
- **Crítico:**  $V_{medido} < 191$  ou  $V_{medido} > 233$ ;

## CAPÍTULO 3

# IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS ORIENTADOS A COMPONENTE

### 3.1 MODELO DE ELEMENTOS RESISTIVOS

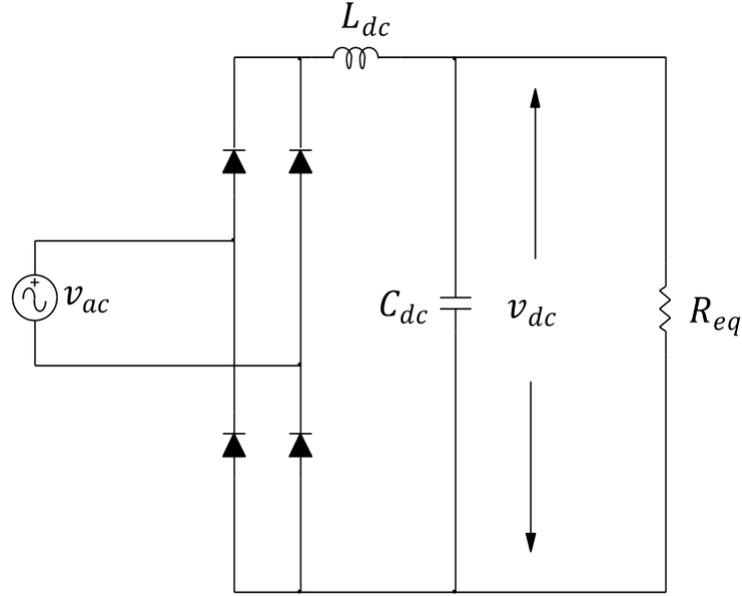
Eletrodomésticos residenciais com funcionamento baseado em aquecimento, de ar ou água, foram modelados como uma resistência linear constante. Dentre os equipamentos considerados na instalação, incluem-se nesta categoria: chuveiros elétricos, fornos elétricos, torradeiras, ferros elétricos e secadores de cabelo.

### 3.2 MODELO DE CARGAS ELETRÔNICAS COM POTÊNCIA DC

Nesta categoria, modelam-se cargas eletrônicas que possuam fontes de alimentação DC. Na literatura (CRESSWELL, 2009), geralmente são referenciadas como cargas com fonte de alimentação comutadas, do inglês: *switch-mode power supplies* (SMPS). Os equipamentos considerados neste grupo são televisores e computadores.

#### 3.2.1 Circuito equivalente

O circuito equivalente simplificado para este modelo foi desenvolvido por (CRESSWELL, 2009) e está representado na Figura 3.1. O circuito equivalente é composto por: ponte retificadora monofásica de diodos,  $L_{dc}$ ,  $C_{dc}$  e  $R_{eq}$ .

**Figura 3.1.** Circuito equivalente para cargas SMPS.

Fonte: (MILANI *et al.*, 2022).

$L_{dc}$  é o indutor no circuito retificado. Possui a função de um PFC passivo, de forma a limitar a corrente de entrada retificada e suas componentes harmônicas. O valor típico para a reatância de  $L_{dc}$ , de forma que os limites de componentes harmônicas sejam atendidos, é de  $X_{Ldc} = 0,03$  pu, sugerido em (CRESSWELL, 2009).

$C_{dc}$  é o capacitor DC no circuito retificado. Possui a função principal de manter o nível de tensão  $V_{dc}$  dentro dos limites de operação. Caso haja uma interrupção de energia, o capacitor deve ser capaz de manter os níveis de tensão por certo tempo “*Hold-up time*”. O tempo geralmente escolhido pela indústria é de 23 ms sendo o fator determinante na escolha de  $C_{dc}$ , mencionado em (CRESSWELL, 2009). O valor típico da reatância de  $C_{dc}$ , de forma a satisfazer o “*Hold-up time*” de 23 ms, é de  $X_{Cdc} = 0,036$  pu, proposto em (CRESSWELL, 2009).

$R_{eq}$  é a resistência equivalente que descreve o funcionamento de todos os elementos após  $C_{dc}$  (CRESSWELL, 2009). A expressão utilizada para determinar  $R_{eq}$  é dada pela Equação 3.1:

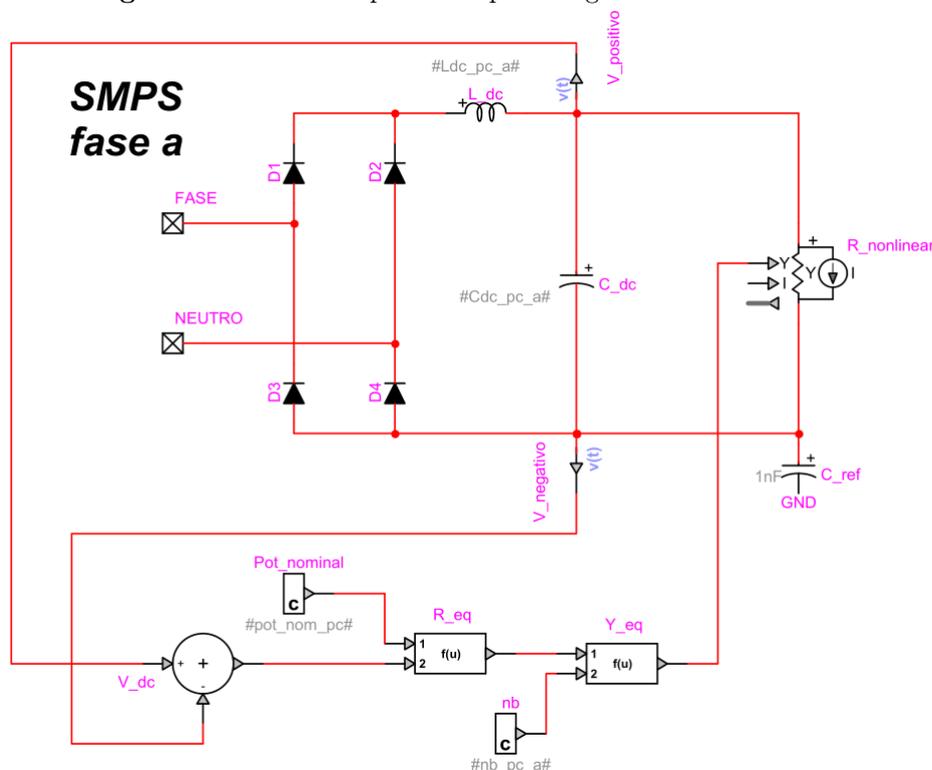
$$R_{eq} = \frac{V_{dc}^2}{P_{SMPS}}, \quad (3.1)$$

em que  $R_{eq}$  é a resistência equivalente,  $P_{SMPS}$  é a potência nominal do equipamento e  $V_{dc}$  a tensão instantânea no capacitor  $C_{dc}$ .

### 3.2.2 Implementação do modelo SMPS no EMTP

A implementação do modelo de cargas SMPS no EMTP segue conforme o circuito equivalente na Figura 3.1. O circuito SMPS no EMTP é exibido na Figura 3.2

Figura 3.2. Circuito equivalente para cargas SMPS no EMTP.



Fonte: autoria própria.

O esquemático da Figura 3.2 representa todos os computadores (PC) na fase A de uma unidade consumidora, o mesmo foi feito para as fases B e C e igualmente para televisores nas fases A, B e C.

O circuito SMPS foi construído com diodos reais (D1-D4), indutor para PFC ( $L_{dc}$ ), capacitor polarizado ( $C_{dc}$ ) e resistência controlada ( $R_{nonlinear}$ ). O bloco nb representa o número de equipamentos conectados à fase A.

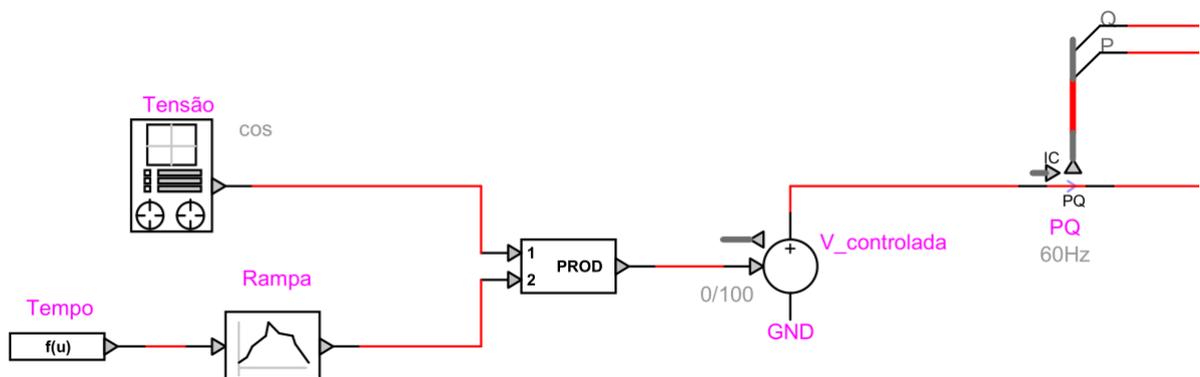
$C_{ref}$  foi um recurso para dar referência de terra (GND) ao circuito retificado, escolheu-se 1 nF de forma que sua impedância seja alta o suficiente para não alterar o funcionamento do circuito. O mesmo poderia ser feito com uma impedância resistiva alta o suficiente conectada à referência.

O circuito da Figura 3.2 mede a tensão  $V_{dc}$  no capacitor e implementa a Equação 3.1 no bloco R\_eq com os valores  $V_{dc}$  e potência nominal do equipamento (PC ou TV). O bloco de resistência controlada no EMTP ( $R_{nonlinear}$ ), é controlado por uma admitância Y, portanto fez-se necessário calcular a admitância equivalente no bloco Y\_eq, invertendo o valor de R\_eq e multiplicando-se pelo número de equipamentos.

### 3.2.3 Validação do modelo SMPS

Com o objetivo de validar o modelo SMPS implementado no EMTP, compararam-se os coeficientes exponenciais, explicados na Seção 2.1.1,  $n_p$  e  $n_q$  obtidos do modelo implementado com os valores de referência na literatura (CRESSWELL, 2009). Com esse propósito, foi aplicado uma fonte de tensão controlada aos terminais do modelo SMPS, similar ao utilizado para validar os modelos de (MILANI *et al.*, 2022), porém com os valores nominais de tensão em Brasília,  $V_{rms} = 220$  V e  $f = 60$  Hz. O esquemático para as validações dos modelos é representado na Figura 3.2.3, em que a tensão fornecida pela fonte controlada varia de 1 a 1,25 pu, quando  $3 \text{ s} < t < 5 \text{ s}$ , como uma rampa. As potências ativa e reativa foram medidas por meio do bloco de medição “PQ” representado.

**Figura 3.3.** Esquemático utilizado para validação dos modelos.

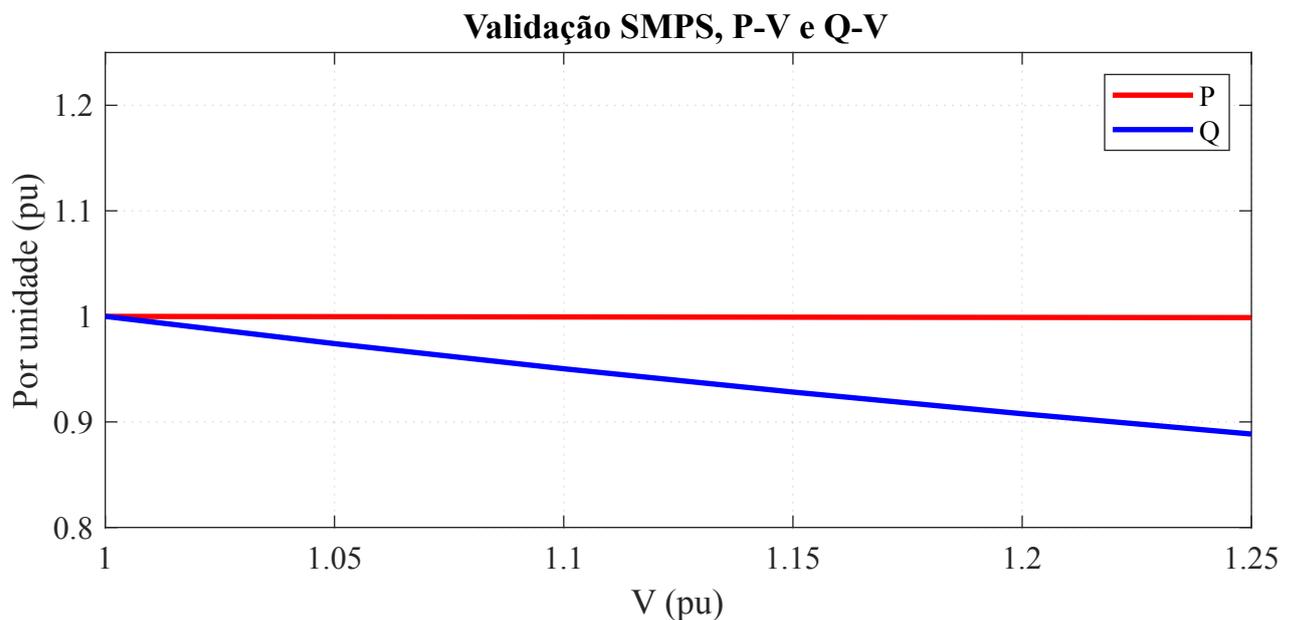


**Fonte:** autoria própria.

Após a medição das potências ativa e reativa durante a variação de tensão, cria-se o gráfico da Figura 3.4, o qual indica a sensibilidade das potências ativa e reativa em relação à variação de tensão na alimentação.

Os coeficientes  $n_p$  e  $n_q$  foram obtidos por meio das derivadas parciais das Equações 2.3 e 2.4 em função da tensão, pois os coeficientes  $n_p$  e  $n_q$  representam, respectivamente, as sensibilidades das potências ativa e reativa em relação à variação de tensão. Os coeficientes deduzidos são  $n_p = -0,0053$  e  $n_q = -0,5298$ . Os valores são próximos aos obtidos em (CRESSWELL, 2009)  $n_p = 0$  e  $n_q = -0,5$ , logo considera-se o modelo SMPS implementado como validado.

**Figura 3.4.** Relações P-V e Q-V nos terminais da carga SMPS do modelo implementado.



**Fonte:** autoria própria.

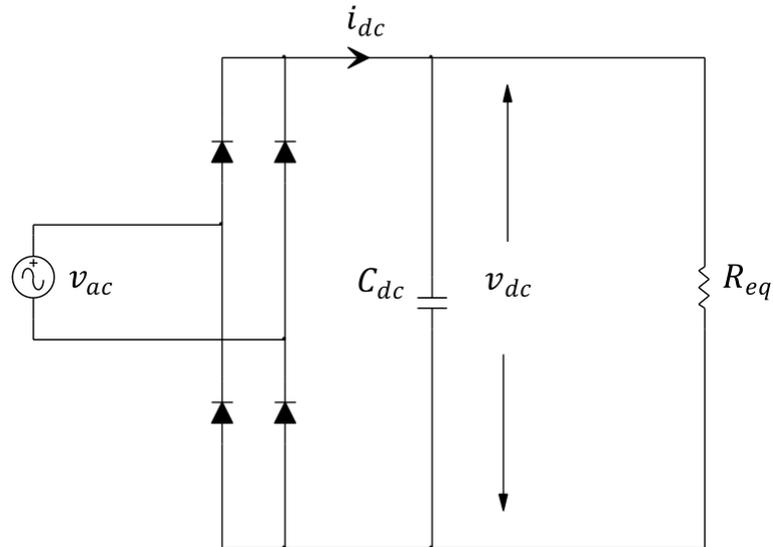
### 3.3 MODELO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES

Nesta categoria, modelaram-se as cargas de lâmpadas fluorescentes, também conhecidas como lâmpadas de descarga. A razão por trás do nome é que, ao se aplicar uma tensão em seus terminais, ionizam o gás inerte contido na lâmpada, formando um plasma. A ionização do gás emite fótons na região ultravioleta que são convertidos à luz visível por meio do pó fluorescente no interior da superfície da lâmpada. O objetivo desta Seção é modelar o funcionamento de uma lâmpada fluorescente compacta, do inglês: *compact fluorescent lamp* (CFL).

### 3.3.1 Circuito equivalente

O circuito equivalente simplificado para este modelo também foi desenvolvido por (CRESSWELL, 2009) e está representado na Figura 3.5. O circuito equivalente é composto por: ponte retificadora monofásica de diodos,  $C_{dc}$  e  $R_{eq}$ .

**Figura 3.5.** Circuito equivalente para cargas CFL.



Fonte: (MILANI *et al.*, 2022).

$C_{dc}$  é o capacitor DC no circuito retificado. Concluiu-se em (CRESSWELL, 2009) que maiores valores de capacitância diminuem as variações de tensão de operação (“*Ripple*”), aumentando a vida útil da lâmpada devido ao menor estresse elétrico de seus terminais, porém, aumentam-se também as componentes harmônicas na corrente de entrada. Portanto, esses dois critérios ditam os limites superior e inferior para  $C_{dc}$ . O valor realista sugerido para a reatância desse capacitor é  $X_{C_{dc}} = 0,25$  pu (CRESSWELL, 2009).

$R_{eq}$  é a resistência equivalente que descreve o funcionamento de todos os elementos após  $C_{dc}$  (CRESSWELL, 2009). A expressão utilizada para determinar  $R_{eq}$  é derivada da relação entre a tensão instantânea do capacitor  $V_{dc}$  e a corrente instantânea após a ponte retificadora  $I_{dc}$ . Concluiu-se em (CRESSWELL, 2009) que  $R_{eq}$  terá uma expressão diferente nos cenários de descarregamento (Equação 3.2) e carregamento (Equação 3.3) do capacitor. As expressões que definem  $R_{eq}$  são:

$$R_{eq1} = 23,7 V_{dc} + 274 \quad (3.2)$$

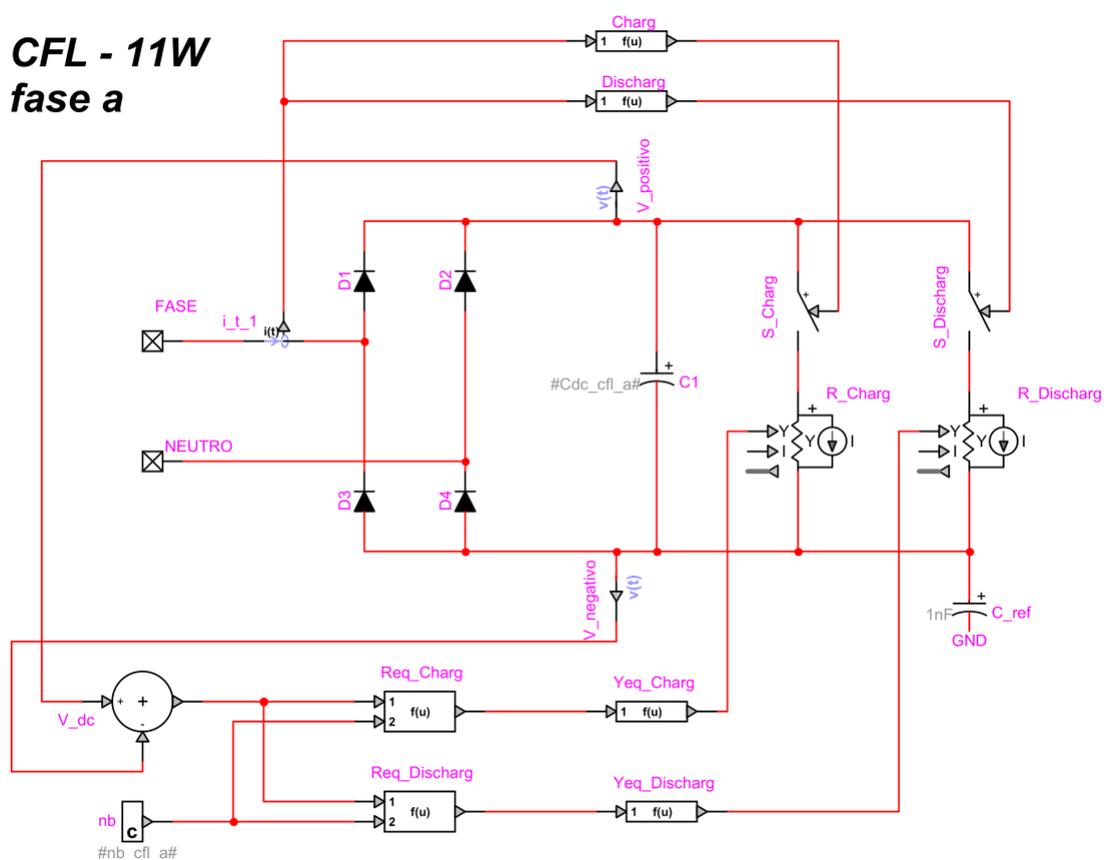
e

$$R_{eq2} = 11 V_{dc} + 0,021 V_{dc}^2 + 1300 \quad (3.3)$$

### 3.3.2 Implementação do modelo CFL no EMTP

A implementação do modelo de cargas CFL no EMTP segue conforme o circuito equivalente na Figura 3.5. O circuito CFL no EMTP é exibido na Figura 3.6.

Figura 3.6. Circuito equivalente para cargas CFL no EMTP.



Fonte: autoria própria.

O esquemático da Figura 3.6 representa todas as lâmpadas fluorescentes na fase A de uma unidade consumidora, o mesmo foi feito para as fases B e C.

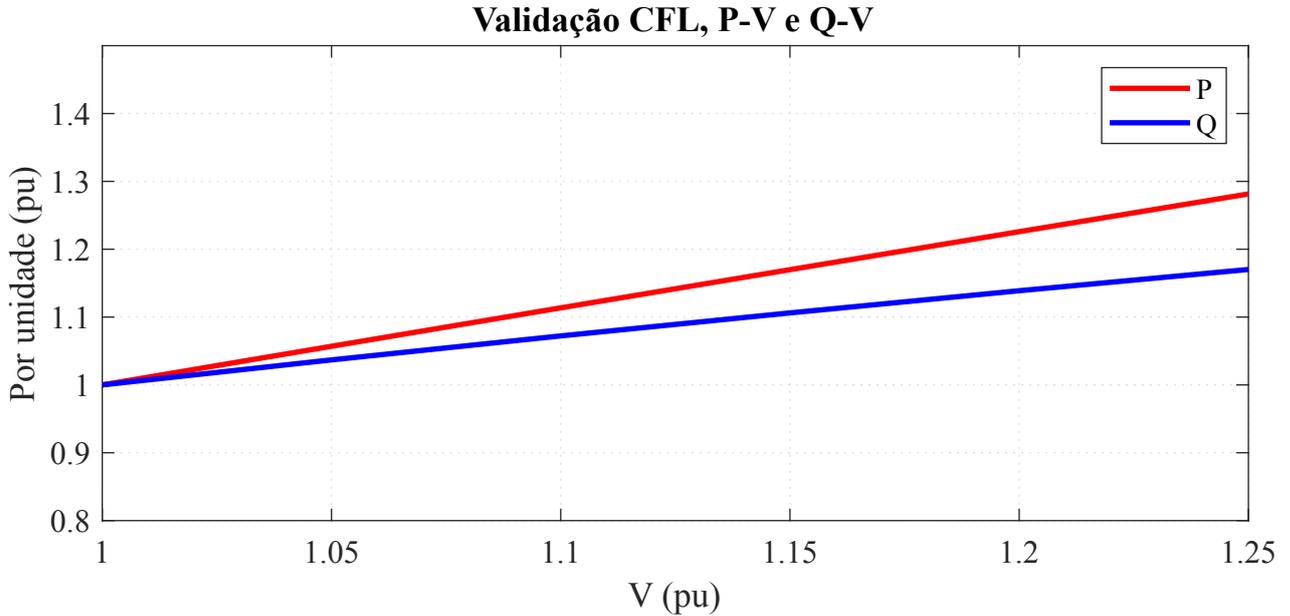
O circuito CFL foi construído com diodos reais (D1-D4), capacitor polarizado ( $C_{dc}$ ) e resistências controladas ( $R_{Charg}$  e  $R_{Discharg}$ ). O bloco nb representa o número de equipamentos conectados à respectiva fase.  $C_{ref}$  é o mesmo recurso explicado na Seção 3.2.2.

O circuito da Figura 3.6 mede a tensão  $V_{dc}$  no capacitor e a usa como entrada nos cálculos das respectivas resistências equivalentes (carregamento e descarregamento do capacitor). A implementação das Equações 3.3 e 3.2 acontece nos blocos Req\_Charg e Req\_Discharg e divide-se as respectivas  $R_{eq}$  pelo número de lâmpadas na respectiva fase. Os blocos de resistência controlada ( $R_{Charg}$  e  $R_{Discharg}$ ), são controlados por admitância Y, portanto fez-se necessário calcular as admitâncias equivalentes nos blocos Yeq\_Charg e Yeq\_Discharg, invertendo os valores de Req\_Charg e Req\_Discharg. O controle de qual resistência não linear estará ativa em um determinado momento é feito por meio das chaves ideias S\_Charg, S\_Discharg e da medição de corrente de entrada antes da ponte retificadora. Caso a corrente de entrada medida seja maior do que zero, o circuito está no momento de carregamento do capacitor, ativando a chave S\_Charg, caso contrário, ativa-se a chave S\_Discharg.

### 3.3.3 Validação

A validação do modelo CFL implementado no EMTP segue os mesmos procedimentos realizados para cargas SMPS, descritos na Subseção 3.2.3. Comparam-se os coeficientes exponenciais  $n_p$  e  $n_q$  obtidos do modelo implementado com os valores de referência na literatura (CRESSWELL, 2009) e (MILANI *et al.*, 2022). A metodologia aplicada nesta validação foi a mesma para cargas SMPS, onde uma fonte de tensão controlada varia a tensão de entrega de 1 a 1,25 pu, quando  $3\text{ s} < t < 5\text{ s}$ , como uma rampa. Após a medição de potências ativa e reativa durante a variação de tensão, cria-se o gráfico da Figura 3.7, o qual indica a sensibilidade das potências ativa e reativa em relação à variação de tensão na alimentação.

Os coeficientes  $n_p$  e  $n_q$  foram obtidos por meio dos mesmos procedimentos realizados na Subseção 3.2.3. Os coeficientes deduzidos foram  $n_p = 1,11$  e  $n_q = 0,71$ . Os valores são próximos aos obtidos em (CRESSWELL, 2009),  $n_p = 0,94$  e  $n_q = 0,52$ , com uma pequena diferença relacionada à diferença entre frequências dos sistemas utilizados, 60 Hz e 50 Hz. Os valores obtidos são, também, próximos aos obtidos em (MILANI *et al.*, 2022),  $n_p = 1,1$  e  $n_q = 0,9$ . Portanto, considera-se o modelo CFL implementado como validado.

**Figura 3.7.** Relações P-V e Q-V nos terminais da carga CFL do modelo implementado.

**Fonte:** autoria própria.

### 3.4 MODELO DE LÂMPADAS LED

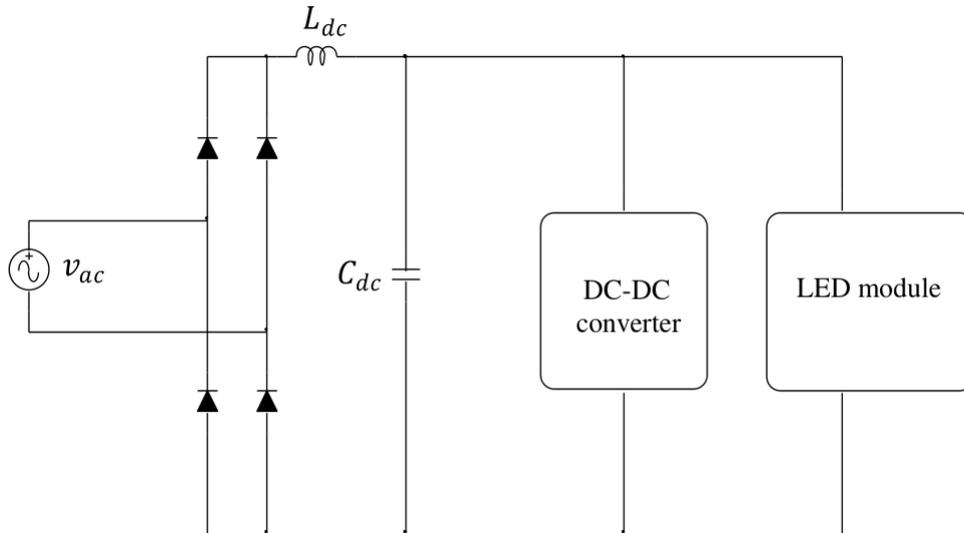
Nesta categoria, modelaram-se as cargas de lâmpadas LED. A lâmpada LED possui a característica principal de ser um conjunto de semicondutores capazes de emitir luz visível quando submetidos a uma corrente elétrica.

#### 3.4.1 Circuito equivalente

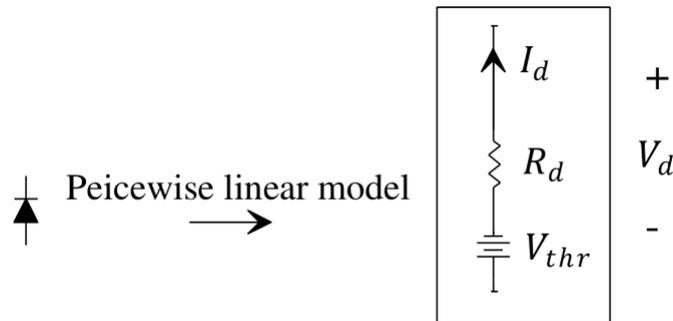
O circuito equivalente simplificado para este modelo foi o mesmo aplicado em (MILANI *et al.*, 2022) e está representado na Figura 3.8. O circuito equivalente é composto por: ponte retificadora monofásica de diodos,  $L_{dc}$ ,  $C_{dc}$ , conversor DC-DC e módulo com um conjunto de LEDs.

O bloco “LED module” é a representação linear de uma lâmpada LED de 30 W composta por um conjunto de dez LEDs de 3 W, dispostos em duas *strings* paralelas de cinco LEDs em série. O modelo linear desse módulo é apresentado na Figura 3.9.

Os valores  $V_{thr}$  e  $R_d$  que representam a lâmpada de 30 W no arranjo considerado são

**Figura 3.8.** Circuito equivalente para cargas LED.

Fonte: (MILANI *et al.*, 2022).

**Figura 3.9.** Representação linear para um conjunto de LEDs.

Fonte: (MILANI *et al.*, 2022).

$V_{thr} = 12 \text{ V}$ ,  $R_d = 1,5 \Omega$  como sugerido em (MILANI *et al.*, 2022). Logo, o módulo de LEDs consome a potência desejada de  $30 \text{ W}$  quando a tensão nos terminais do módulo como um todo é de  $15 \text{ V}$ .

O conversor DC-DC utilizado foi o *flyback*, pois é uma das topologias mais utilizadas em *drivers* de LEDs, Figura 3.10. O modelo do conversor *flyback* utilizado é composto por um transformador ideal com uma relação de transformação de  $n = \frac{N_2}{N_1}$ . O primário do transformador recebe uma tensão DC como entrada ( $V_{Cdc1}$ ) e possui uma chave controlada por um gerador de pulsos ( $SW$ ) que determina o ciclo de trabalho. Já no secundário do transformador, a saída de tensão DC é a tensão sobre um capacitor ( $V_{Cdc2}$ ) que tem a função de filtro, conectado em

série com um diodo (D5). A função de transferência da tensão DC do conversor é dado pela Equação 3.4:

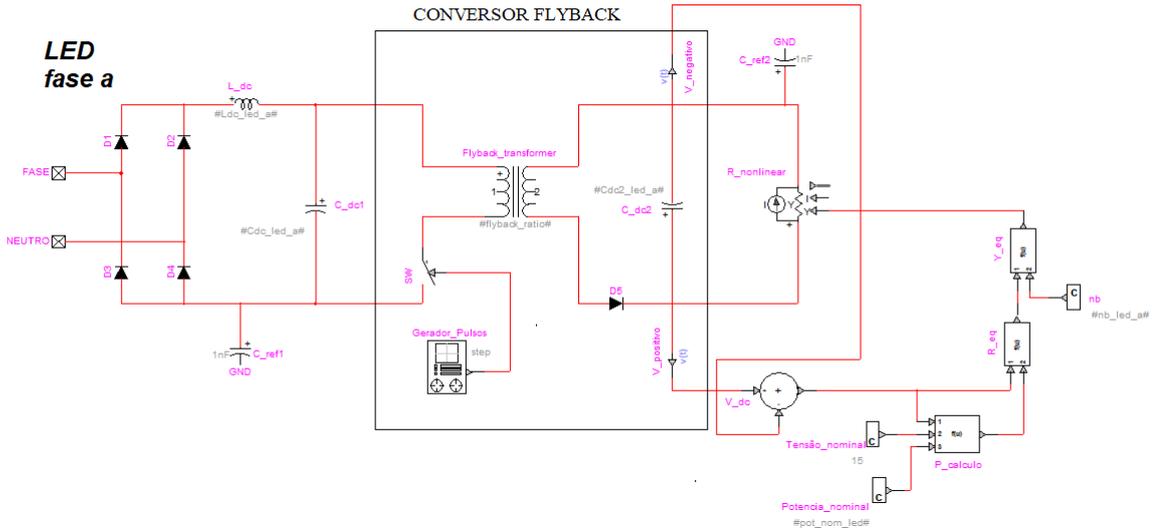
$$\frac{V_{Cdc2}}{V_{Cdc1}} = \frac{D}{n(1-D)}, \quad (3.4)$$

de forma que  $V_{Cdc1}$  é a tensão DC na entrada do conversor,  $V_{Cdc2}$  é a tensão na saída do conversor,  $D$  é o ciclo de trabalho e  $n$  é a relação de transformação.

### 3.4.2 Implementação do modelo LED no EMTP

A implementação do modelo de cargas LED no EMTP segue conforme o circuito equivalente na Figura 3.8. O circuito LED no EMTP é exibido na Figura 3.10.

**Figura 3.10.** Circuito equivalente para cargas LED no EMTP.



**Fonte:** autoria própria.

O esquemático da Figura 3.10 representa todas as lâmpadas LED na fase A de uma unidade consumidora, o mesmo foi feito para as fases B e C.

O circuito LED foi construído com diodos reais (D1-D5), capacitores polarizados ( $C_{dc1}$  e  $C_{dc2}$ ) e resistência controlada ( $R_{nonlinear}$ ). O bloco nb representa o número de equipamentos conectados à respectiva fase.  $C_{ref1}$ ,  $C_{ref2}$  são o mesmo recurso explicado na Seção 3.2.2.

O circuito da Figura 3.10 possui uma diferença ao implementado em (MILANI *et al.*, 2022). Escolheu-se substituir o módulo de LEDs com uma “caixa preta” que executa a Equação do

modelo exponencial apresentado em 2.3, utilizando o valor de  $n_p$  encontrado em (MILANI *et al.*, 2022),  $n_p = 2$ . Dessa forma, o circuito mede a tensão instantânea na saída do conversor *flyback* ( $C_{dc2}$ ) e calcula a potência instantânea que o módulo de LEDs deve consumir por meio da Equação 3.5.

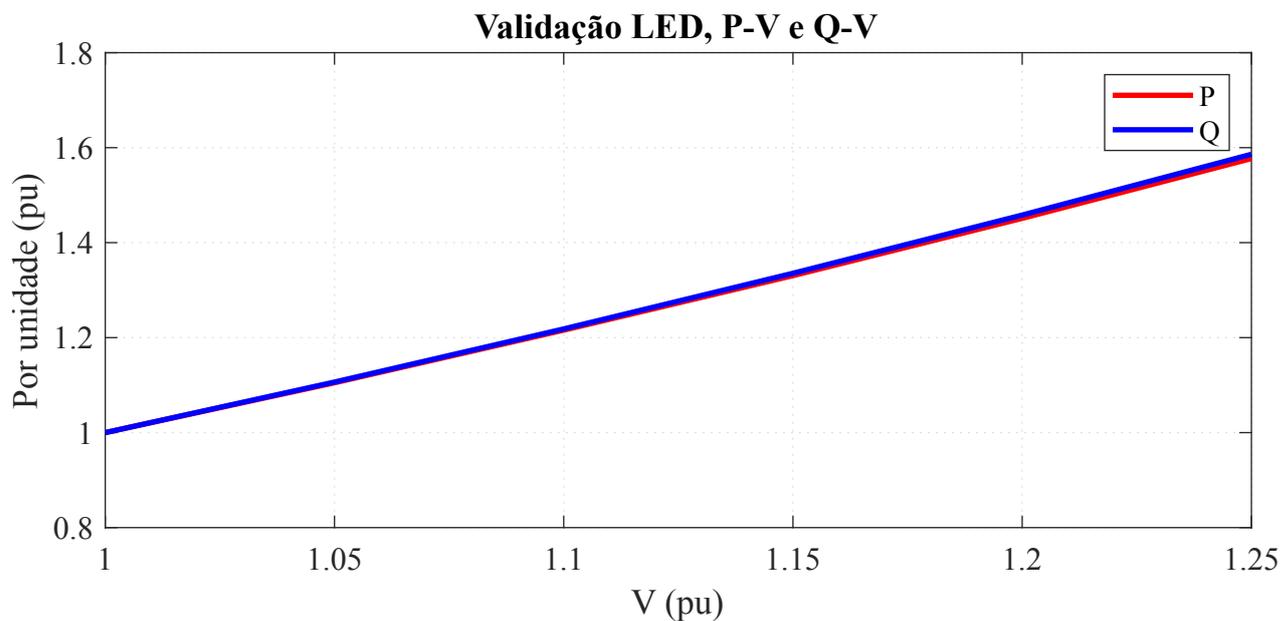
$$P_{calculado} = P_{nominal} \left( \frac{V_{medido}}{V_{nominal}} \right)^{n_p} \quad (3.5)$$

O cálculo da Resistência equivalente instantânea se dá pela lei de Ohm no bloco  $R_{eq}$ , utilizando a tensão e potência instantâneas. O bloco de resistência controlada ( $R_{nonlinear}$ ) é controlado por admitância  $Y$ , portanto fez-se necessário calcular a admitância equivalente no bloco  $Y_{eq}$ , invertendo-se os valores de  $R_{eq}$  e multiplicando-se o valor por  $nb$ , de forma a representar o consumo de todas as lâmpadas LED na respectiva fase conectada.

### 3.4.3 Validação

A validação do modelo LED implementado no EMTP segue os mesmos procedimentos realizados para cargas SMPS, descritos na Subseção 3.2.3. Comparam-se os coeficientes exponenciais  $n_p$  e  $n_q$  obtidos do modelo implementado com os valores de referência na literatura (MILANI *et al.*, 2022). A metodologia aplicada nesta validação foi a mesma para cargas SMPS, onde uma fonte de tensão controlada varia a tensão de entrega de 1 a 1,25 pu, quando  $3 \text{ s} < t < 5 \text{ s}$  como uma rampa. Após a medição de potências ativa e reativa durante a variação de tensão, cria-se o gráfico da Figura 3.11, o qual indica a sensibilidade das potências ativa e reativa em relação à variação de tensão na alimentação.

Os coeficientes  $n_p$  e  $n_q$  foram obtidos por meio dos mesmos procedimentos realizados na Subseção 3.2.3. Os coeficientes deduzidos foram  $n_p = 2,04$  e  $n_q = 2,06$ . Os valores são próximos aos obtidos em (MILANI *et al.*, 2022),  $n_p = 2$  e  $n_q = 1,9$ . Portanto, considera-se o modelo LED implementado como validado.

**Figura 3.11.** Relações P-V e Q-V nos terminais da carga LED.

**Fonte:** autoria própria.

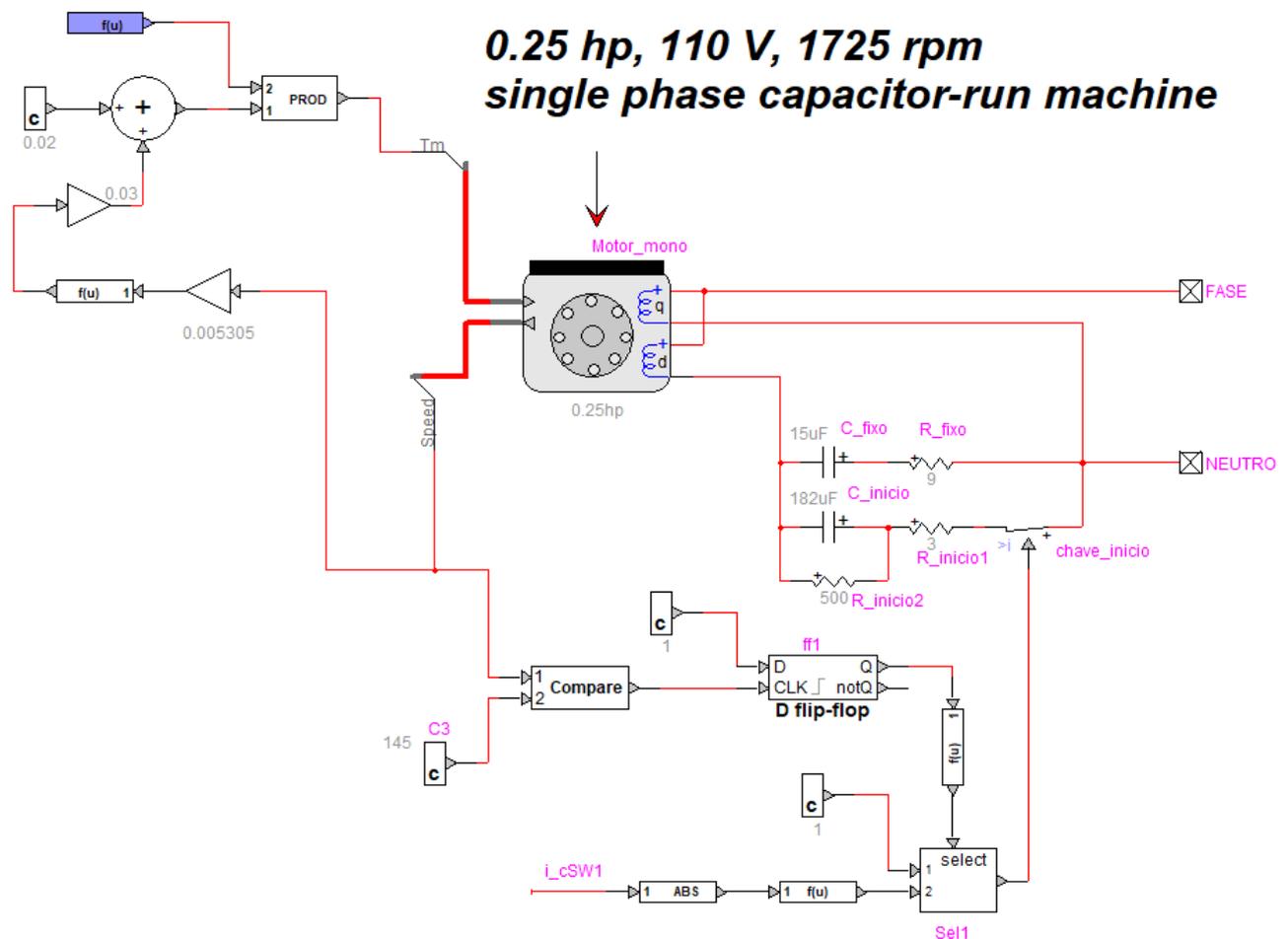
### 3.5 MODELO DE MOTORES MONOFÁSICOS

Nesta categoria, modelaram-se as cargas de motores de indução monofásicos. Incluem-se os seguintes equipamentos da unidade consumidora: máquina de lavar, ares-condicionados, geladeiras, *freezers*, aspirador de pó, exaustores e motor de portão.

#### 3.5.1 Implementação de motores monofásicos no EMTP

Nesta Seção, não foi possível seguir a mesma metodologia de se utilizar um circuito equivalente por unidade que representasse um mesmo conjunto de cargas devido à diferença entre versões utilizadas no EMTP no presente trabalho e em (MILANI *et al.*, 2022). Portanto a solução adotada foi chavear blocos contendo o circuito exemplo para partida de um motor monofásico de 0.25 hp disponível no software EMTP. A Figura 3.12 mostra o circuito exemplo que foi chaveado.

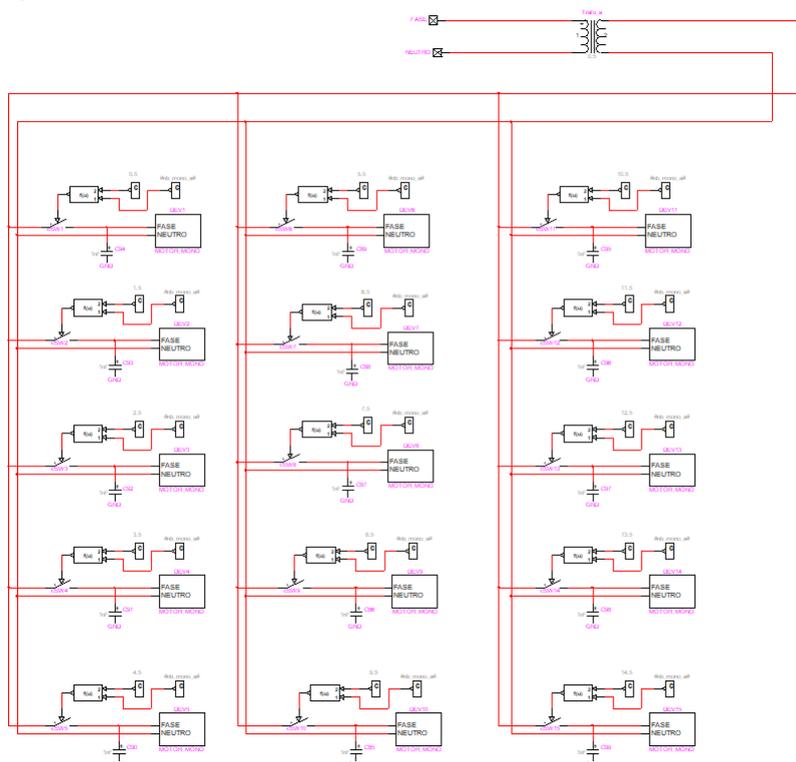
**Figura 3.12.** Circuito exemplo para partida de motor monofásico no EMTP.



**Fonte:** autoria própria.

O circuito da Figura 3.12 possui um sistema de partida com uma impedância capacitiva fixa e uma impedância capacitiva que é desconectada ao se atingir a velocidade nominal do motor. Utilizou-se o sistema de controle por torque que relaciona a velocidade de rotação instantânea com a resistência do ar.

A Figura 3.13 representa o chaveamento dos blocos contendo circuitos da Figura 3.12 na fase A, o mesmo foi feito para as fases B e C. O número de motores ativos é controlado por meio de código máscara de forma que a potência ativa em regime permanente por fase tenha um erro menor que 0,25 hp do previsto no código. Com o objetivo de conectar o circuito da Figura 3.13 à rede de Brasília 380/220  $V_{rms}$ , foi necessário utilizar um transformador ideal com relação de transformação  $n = 0,5$  já que o circuito da Figura 3.12 é validado para a tensão nominal de 110  $V_{rms}$ .

**Figura 3.13.** Circuito monofásico de chaveamento de motores de 0,25 hp.

Fonte: autoria própria.

### 3.6 MODELO DE MOTORES TRIFÁSICOS

Nesta categoria, modelaram-se as cargas de motores de indução trifásicos. Como o escopo do presente trabalho é o setor residencial, não foram considerados motores trifásicos que necessitam de *drivers* inversores de frequência. As cargas residenciais consideradas foram elevador e bomba para caixa d'água.

#### 3.6.1 Implementação de motores trifásicos no EMTP

Utilizou-se o bloco “*Asynchronous Machine Model*” existente na biblioteca do EMTP assim como em (MILANI *et al.*, 2022). Os dados necessários para o modelo são: potência aparente nominal [kVA], tensão de linha nominal [ $kV_{rms}$ ], frequência de operação [Hz] e número de polos do motor.

Os dados elétricos sugeridos em (MILANI *et al.*, 2022) foram empregados em pu. A Tabela

3.1 resume os dados utilizados para a descrição do elevador e da bomba d’água.

**Tabela 3.1.** Parâmetros elétricos considerados para motores trifásicos.

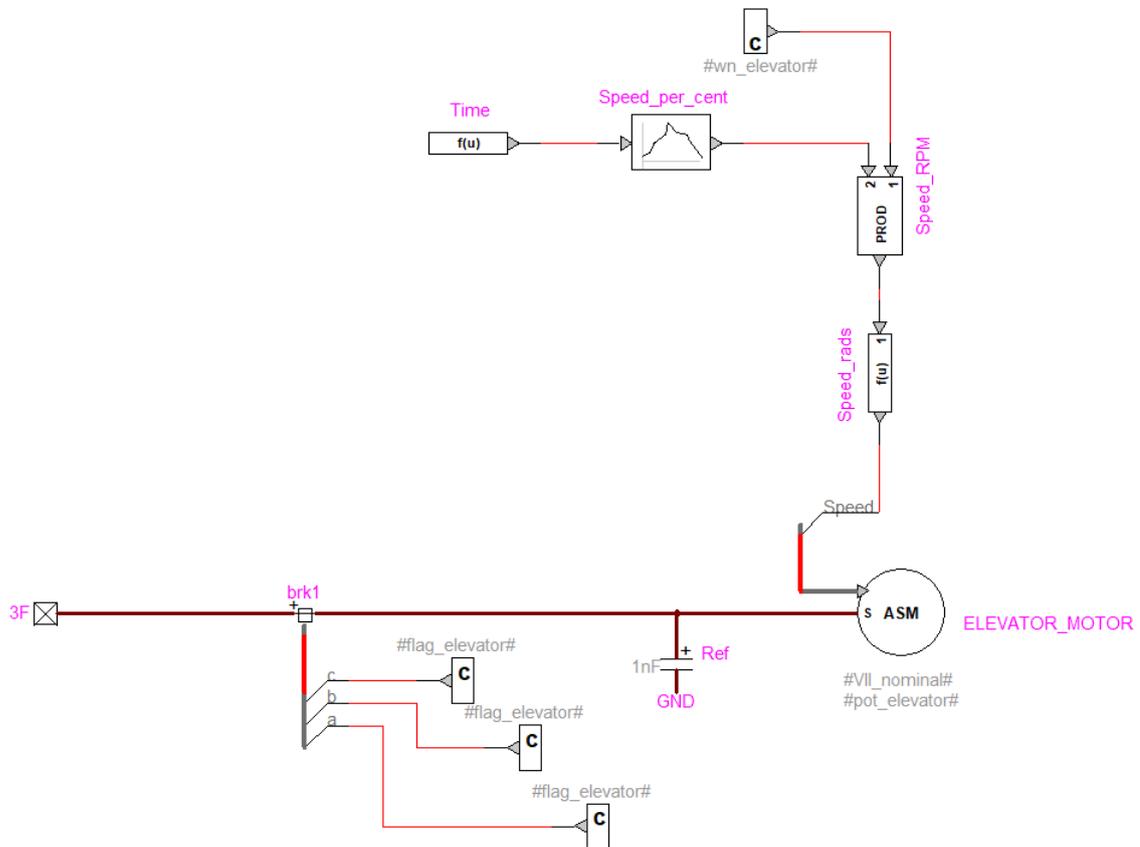
Tipo de carga	$R_s$ (pu)	$X_s$ (pu)	$L_M$ (pu)	$R_{r1}$ (pu)	$X_{r1}$ (pu)	$R_{r2}$ (pu)	$X_{r2}$ (pu)
Bomba	0,03	0,1	1,7	0,02	0,1	0,13	0,04
Elevador	0,04	0,04	2,1	0,02	0,13	0,07	0,04

Fonte: (MILANI *et al.*, 2022).

A Figura 3.14 mostra a implementação da “*Asynchronous Machine Model*”. Para a partida do motor, adotou-se o sistema de controle por velocidade.

O bloco “Speed\_per\_cent” é uma Tabela verdade da relação entre a velocidade instantânea e velocidade síncrona calculada no código máscara. O perfil de velocidade adotado foi uma rampa crescente para os instantes  $0 \text{ s} < t < 0,2 \text{ s}$  e para  $t > 0,2 \text{ s}$  mantêm-se no valor nominal de operação. Para a entrada de controle do motor, fez-se necessário converter a velocidade percentual para rad/s nos blocos “Speed\_RPM” e “Speed\_rads”.

**Figura 3.14.** Circuito para motor de indução trifásico.



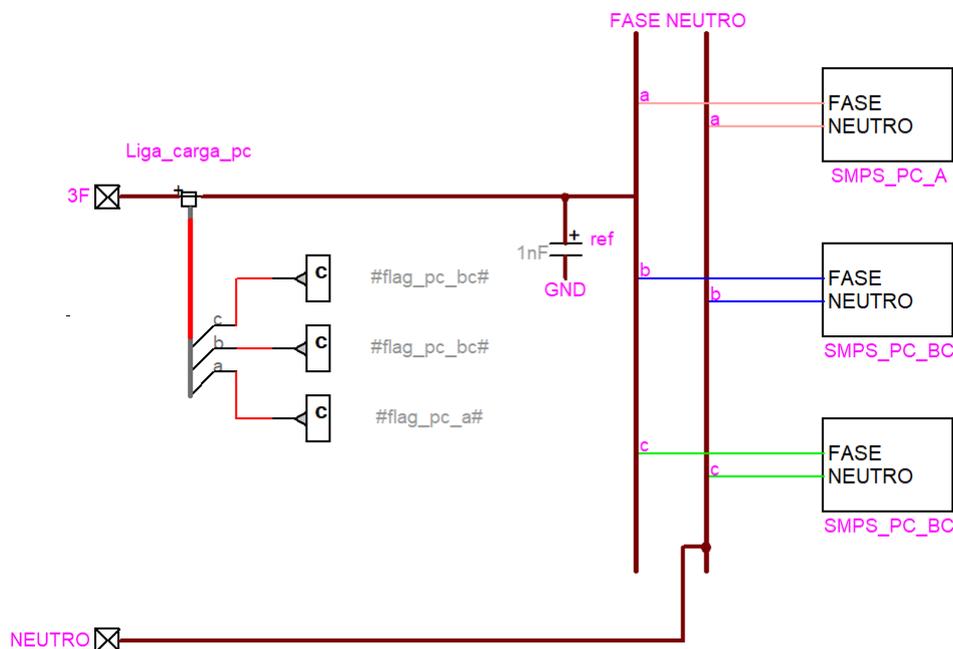
Fonte: autoria própria.

## UNIDADE CONSUMIDORA MODELADA A COMPONENTE

### 4.1 PROCEDIMENTOS PARA A JUNÇÃO DOS MODELOS EM UMA UNIDADE CONSUMIDORA

A Figura 4.1, mostra o esquema de ligação adotado na criação de blocos trifásicos para os modelos monofásicos apresentados no Capítulo 3.

**Figura 4.1.** Criação de bloco trifásico com modelos monofásicos.



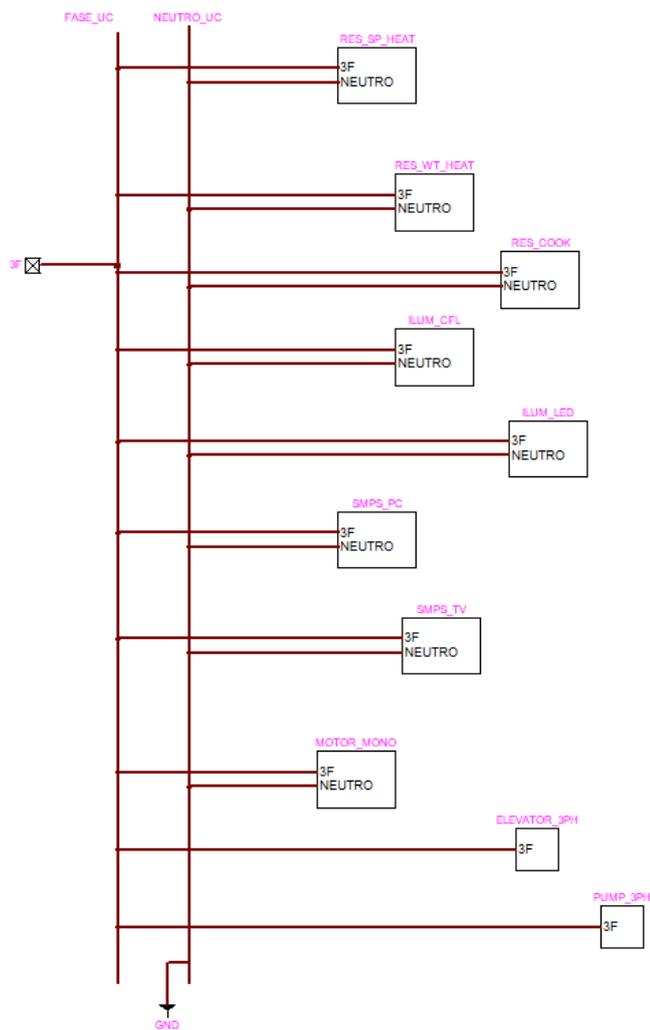
**Fonte:** autoria própria.

A chave controlada (“Liga\_carga”) é comandada por código máscara e secciona a alimentação do circuito caso não haja potência destinada a esse tipo de carga. O controle é feito por meio das variáveis “flag” no código máscara. O capacitor *ref* possui a função de dar referência aos sinais caso a chave controlada esteja seccionada.

Considerou-se um fator de desbalanceamento nos blocos trifásicos de cargas monofásicas. O código máscara recebe como entrada a potência ativa destinada a esse bloco e um percentual destinado à fase A. O restante da potência destinada ao bloco trifásico é dividido igualmente entre as fases B e C.

A Figura 4.2 representa a ligação de todos os blocos trifásicos para a criação de um único bloco chamado “UC”, representando todos os tipos de carga presentes em uma unidade consumidora. O barramento trifásico “FASE\_UC” alimenta todos os blocos trifásicos modelados e o barramento “NEUTRO\_UC” reúne todos os neutros dos modelos trifásicos e os aterram em “GND”.

**Figura 4.2.** Criação de bloco para Unidade Consumidora - “UC”.



**Fonte:** autoria própria.

## 4.2 CÓDIGO MÁSCARA PARA CONTROLE DOS MODELOS DO BLOCO UC

O EMTP permite a criação de código máscara para o controle de parâmetros de um bloco, dessa forma, é possível inserir todos os valores nominais do sistema assim como todos os equacionamentos necessários para cada componente. A linguagem de programação utilizada é o JavaScript.

### 4.2.1 Código máscara para os elementos resitivos

Criaram-se três blocos trifásicos de elementos resistivos, sendo eles: “RES\_COOKING”, “RES\_WT\_HEAT” e “RES\_SP\_HEAT” (Figura 4.2). Os sufixos dos blocos destinam potência ativa à culinária, ao aquecimento de água e ao aquecimento geral de equipamentos, respectivamente. A fim de evitar repetições, esta Seção apresenta as entradas e o código máscara para o bloco “RES\_COOKING”, porém o código completo apresenta também para os blocos “RES\_WT\_HEAT” e “RES\_SP\_HEAT”. Portanto, o sufixo “*cooking*” do código pode ser substituído para “*wt\_heat*” e “*sp\_heat*”.

O código que implementa os modelos da Seção 3.1 recebe os seguintes valores de entrada:

- $V_{base}$ : tensão  $V_{rms}$  de operação da Unidade Consumidora;
- $POT_{inst\_cooking}$ : potência ativa instalada destinada à culinária [W];
- $p_{cooking}$ : valor percentual da potência instalada que será demandada em regime permanente;
- $f_{desbalanc\_cook}$ : fator de desbalanceamento de carga para a fase A.

**Script 4.1.** Código máscara para elementos resistivos.

```

1 //Potencia destinada a carga.
2 POT_cooking = POT_inst_cooking * p_cooking;
3 textbf{//Potencia destinada a fase A.}
4 POT_cooking_a = POT_cooking * f_desbalanc_cook;           ...
   textbf{//Potencia destinada as fases B e C.}
5 POT_cooking_b_c = (POT_cooking - POT_cooking_a)/2;
6 textbf{//Resistencia equivalente da fase A}
7 if(POT_cooking_a > 0)
8 {R_cooking_a = (V_base*V_base)/ POT_cooking_a;
9 flag_cook_a = -1;}
10 textbf{//Desliga o respectivo bloco, flag = 1}
11 else { R_cooking_a=1; flag_cook_a = 1;}
12 textbf{//Resistencia equivalente das fases B e C}
13 if(POT_cooking_b_c > 0)
14 {R_cooking_bc = (V_base*V_base)/ POT_cooking_b_c;
15 flag_cook_bc = -1;}
16 textbf{//Desliga o respectivo bloco, flag = 1}
17 else{ R_cooking_bc=1; flag_cook_bc = 1;}

```

#### 4.2.2 Código máscara para cargas eletrônicas com potência DC

Criaram-se dois blocos trifásicos de elementos SMPS, sendo eles: “SMPS\_PC”, “SMPS\_TV” (Figura 4.2). Os sufixos dos blocos destinam potência ativa aos computadores e aos televisores, respectivamente. Novamente, a fim de se evitar repetições, esta Seção apresenta as entradas e o código máscara para o bloco “SMPS\_PC”, porém o código completo apresenta também a máscara para o bloco “SMPS\_TV”. Portanto, o sufixo “pc” do código pode ser substituído para “tv”.

O código que implementa os modelos da Seção 3.2 recebe os seguintes valores de entrada:

- $V_{base}$ : tensão  $V_{rms}$  de operação da Unidade Consumidora;
- Freq: frequência de operação da rede em Hertz;
- POT\_inst\_SMPS\_PC: potência ativa instalada de computadores [W];
- p\_pc: valor percentual da potência instalada que será demandada em regime permanente;
- f\_desbalanc\_pc: fator de desbalanceamento de carga para a fase A;
- pot\_nom\_pc: potência nominal para computadores [W].

**Script 4.2.** Código máscara para carga SMPS.

```

1 //Potencia destinada a carga.
2 POT_pc = POT_inst_SMPS_PC* p_pc;
3 //Potencia destinada a fase A.
4 POT_pc_a = POT_pc* f_desbalanc_pc;
5 //Potencia destinada as fases B e C.
6 POT_pc_b_c = (POT_pc - POT_pc_a)/2;
7 //Calculo de parametros para circuito da fase A.
8 if(POT_pc_a > 0)
9 //Impedancia base na fase A.
10 {Z_base_pc_a = (V_base * V_base) / POT_pc_a;
11 //Reatancia capacitiva na fase A.
12 X_Cdc_pc_a = 0.036 * Z_base_pc_a;
13 //Reatancia indutiva na fase A.
14 X_Ldc_pc_a = 0.03* Z_base_pc_a;
15 //Capacitancia na fase A.
16 Cdc_pc_a = 1/(X_Cdc_pc_a * 2 * PI * Freq);
17 //Indutancia na fase A.
18 Ldc_pc_a = X_Ldc_pc_a/( 2* PI * Freq);
19 //Numero de equipamentos na fase A.
20 nb_pc_a = POT_pc_a/pot_nom_pc;
21 flag_pc_a = -1};
22 //Desliga o respectivo bloco, flag = 1
23 else{Cdc_pc_a = 1; Ldc_pc_a = 1; nb_pc_a = 1; flag_pc_a = 1;}
24 //Calculo de parametros para circuitos das fase B e C.
25 if(POT_pc_b_c > 0)
26 //Impedancia base nas fases B e C.
27 {Z_base_pc_bc = (V_base * V_base) / POT_pc_b_c;
28 //Reatancia capacitiva nas fases B e C.
29 X_Cdc_pc_bc = 0.036 * Z_base_pc_bc;
30 //Reatancia indutiva nas fases B e C.
31 X_Ldc_pc_bc = 0.03* Z_base_pc_bc;
32 //Capacitancia nas fases B e C.
33 Cdc_pc_bc = 1/(X_Cdc_pc_bc * 2 * PI * Freq);
34 //Indutancia nas fases B e C.
35 Ldc_pc_bc = X_Ldc_pc_bc/( 2* PI * Freq);
36 //Numero de equipamentos nas fases B e C.
37 nb_pc_bc = POT_pc_b_c/pot_nom_pc;
38 flag_pc_bc = -1;}
39 //Desliga o respectivo bloco, flag = 1
40 else{Cdc_pc_bc = 1; Ldc_pc_bc = 1; nb_pc_bc = 1; flag_pc_bc = 1;}

```

### 4.2.3 Código máscara cargas de lâmpadas fluorescentes

O código que implementa os modelos da Seção 3.3 recebe os seguintes valores de entrada:

- $V_{base}$ : tensão  $V_{rms}$  de operação da Unidade Consumidora;
- Freq: frequência de operação da rede em Hertz;
- POT\_inst\_CFL: potência ativa instalada de lâmpadas fluorescentes [W];

- $p_{cfl}$ : valor percentual da potência instalada que será demandada em regime permanente;
- $f_{desbalanc\_cfl}$ : fator de desbalanceamento de carga para a fase A.

**Script 4.3.** Código máscara para carga CFL.

```

1 //Potencia destinada a carga.
2 POT_cfl = POT_inst_CFL * p_cfl;
3 //Potencia destinada a fase A.
4 POT_cfl_a = POT_cfl* f_desbalanc_cfl;
5 //Potencia destinada as fases B e C.
6 POT_cfl_b_c = (POT_cfl - POT_cfl_a)/2;
7 //Potencia nominal da lampada fluorescente considerada.
8 pot_nom_cfl = 11;
9 //Caculo de parametros para circuito da fase A.
10 if(POT_cfl_a > 0)
11 //Impedancia base na fase A.
12 {Z_base_cfl_a = (V_base * V_base) / POT_cfl_a;
13 //Reatancia capacitiva na fase A.
14 X_Cdc_cfl_a = 0.25 * Z_base_cfl_a;
15 //Capacitancia na fase A.
16 Cdc_cfl_a = 1/(X_Cdc_cfl_a * 2 * PI * Freq);
17 //Numero de equipamentos na fase A.
18 nb_cfl_a = POT_cfl_a/pot_nom_cfl;
19 flag_cfl_a = -1;}
20 //Desliga o respectivo bloco, flag = 1
21 else{Cdc_cfl_a = 1; nb_cfl_a = 1; flag_cfl_a = 1;}
22 //Caculo de parametros para circuito das fases B e C.
23 if(POT_cfl_b_c > 0)
24 //Impedancia base nas fases B e C.
25 {Z_base_cfl_bc = (V_base * V_base) / POT_cfl_b_c;
26 //Reatancia capacitiva nas fases B e C.
27 X_Cdc_cfl_bc = 0.25 * Z_base_cfl_bc;
28 //Capacitancia nas fases B e C.
29 Cdc_cfl_bc = 1/(X_Cdc_cfl_bc * 2 * PI * Freq);
30 //Numero de equipamentos nas fases B e C.
31 nb_cfl_bc = POT_cfl_b_c/pot_nom_cfl;
32 flag_cfl_bc = -1;}
33 //Desliga o respectivo bloco, flag = 1
34 else{Cdc_cfl_bc = 1; nb_cfl_bc = 1; flag_cfl_bc = 1;}

```

#### 4.2.4 Código máscara cargas de lâmpadas LED

O código que implementa os modelos da Seção 3.4 recebe os seguintes valores de entrada:

- $V_{base}$ : tensão  $V_{rms}$  de operação da Unidade Consumidora;
- $Freq$ : frequência de operação da rede em Hertz;

- POT\_inst\_LED: potência ativa instalada de lâmpadas LED [W];
- p\_led: valor percentual da potência instalada que será demandada em regime permanente;
- f\_desbalanc\_led: fator de desbalanceamento de carga para a fase A;
- pot\_nom\_led: potência nominal para a lâmpada LED [W].

**Script 4.4.** Código máscara para carga LED.

```

1 //Potencia destinada a carga.
2 POT_led = POT_inst_LED * p_led;
3 //Potencia destinada a fase A.
4 POT_led_a = POT_led* f_desbalanc_led;
5 //Potencia destinada as fases B e C.
6 POT_led_b_c = (POT_led - POT_led_a)/2;
7 //Relacao de transformacao do transformador ideal do conversor flyback
8 flyback_ratio = -0.057;
9 //Frequencia de chaveamento do flyback
10 freq_chaveamento_flyb_hz = 1000;
11 chaveamento_periodo = 1/freq_chaveamento_flyb_hz;
12 chaveamento_width= chaveamento_periodo*0.4;
13 //Calculo de parametros para circuito da fase A.
14 if(POT_led_a > 0)
15 //Impedancia base na fase A.
16 {Z_base_led_a = (V_base * V_base) / POT_led_a;
17 //Reatancia capacitiva na fase A.
18 X_Cdc_led_a = 0.036 * Z_base_led_a;
19 //Reatancia indutiva na fase A.
20 X_Ldc_led_a = 0.03* Z_base_led_a;
21 //Capacitancia na fase A.
22 Cdc_led_a = 1/(X_Cdc_led_a * 2 * PI * Freq);
23 //Indutancia na fase A.
24 Ldc_led_a = X_Ldc_led_a/( 2* PI * Freq);
25 Cdc2_led_a = 100*Cdc_led_a;
26 //Numero de equipamentos na fase A.
27 nb_led_a = POT_led_a/pot_nom_led;
28 flag_led_a = -1;}
29 //Desliga o respectivo bloco, flag = 1
30 else{Cdc_led_a = 1; Ldc_led_a = 1; Cdc2_led_a = 1; nb_led_a = 1; ...
      flag_led_a = 1;}
31 //Calculo de parametros para circuito das fases B e C.
32 if(POT_led_b_c > 0)
33 //Impedancia base nas fases B e C.
34 {Z_base_led_bc = (V_base * V_base) / POT_led_b_c;
35 //Reatancia capacitiva nas fases B e C.
36 X_Cdc_led_bc = 0.036 * Z_base_led_bc;
37 //Reatancia indutiva nas fases B e C.
38 X_Ldc_led_bc = 0.03* Z_base_led_bc;
39 //Capacitancia nas fases B e C.
40 Cdc_led_bc = 1/(X_Cdc_led_bc * 2 * PI * Freq);
41 //Indutancia nas fases B e C.

```

```

42 Ldc_led_bc = X_Ldc_led_bc/( 2* PI * Freq);
43 Cdc2_led_bc = 100*Cdc_led_bc;
44 //Numero de equipamentos nas fases B e C.
45 nb_led_bc = POT_led_b_c/pot_nom_led;
46 flag_led_bc = -1; }
47 //Desliga o respectivo bloco, flag = 1
48 else{Cdc_led_bc = 1; Ldc_led_bc = 1; Cdc2_led_bc = 1; nb_led_bc = 1; ...
      flag_led_bc = 1;}

```

#### 4.2.5 Código máscara para motores monofásicos

O código que implementa os modelos da Seção 3.5 recebe os seguintes valores de entrada:

- Freq: frequência de operação da rede em Hertz;
- POT\_inst\_motorlph: potência ativa instalada de motores monofásicos [W];
- p\_motorlph: valor percentual da potência instalada que será demandada em regime permanente;
- f\_desbalanc\_motorlph: fator de desbalanceamento de carga para a fase A.

**Script 4.5.** Código máscara para motores monofásicos.

```

1 //Potencia destinada a carga. fp = 0,771
2 POT_motorlph = POT_inst_motorlph * p_motorlph;
3 //Potencia destinada a fase A.
4 POT_motorlph_a = POT_motorlph * f_desbalanc_motorlph;
5 //Potencia destinada as fases B e C.
6 POT_motorlph_b_c = (POT_motorlph - POT_motorlph_a)/2;
7 //Numero de motores monofasicos na fase A. (210,5 W = consumo de um 1 ...
      bloco motor lph com partida)
8 if(POT_motorlph_a > 0)
9 {nb_mono_a = POT_motorlph_a /210.5;
10 flag_lph_motor_a = -1;}
11 //Desliga o respectivo bloco, flag = 1
12 else{nb_mono_a = 0 ; flag_lph_motor_a = 1;}
13 //Numero de motores monofasicos nas fases B e C. (210,5 W = consumo de um ...
      1 bloco motor lph com partida)
14 if(POT_motorlph_b_c > 0)
15 {nb_mono_bc =POT_motorlph_b_c /210.5;
16 flag_lph_motor_bc = -1;}
17 //Desliga o respectivo bloco, flag = 1
18 else{nb_mono_bc = 0 ; flag_lph_motor_bc = 1;}

```

### 4.2.6 Código máscara para motores trifásicos

Criaram-se dois blocos trifásicos de motores trifásicos, sendo eles: “ELEVATOR\_3PH”, “PUMP\_3PH” (Figura 4.2). Esta Seção apresenta as entradas e o código máscara para o bloco “ELEVATOR\_3PH”, porém o código completo apresenta também para o bloco “PUMP\_3PH”. Portanto, o sufixo “elevador” do código pode ser substituído para “pump”.

O código que implementa os modelos da Seção 3.6 recebe os seguintes valores de entrada:

- $V_{base}$ : tensão  $V_{rms}$  de operação da Unidade Consumidora;
- Freq: frequência de operação da rede em Hertz;
- POT\_inst\_elevator: potência aparente demandada em regime permanente dos motores trifásicos [VA];
- p\_elevator: valor percentual da potência demandada regime permanente;
- npoles\_elevator: número de polos dos motores trifásicos.

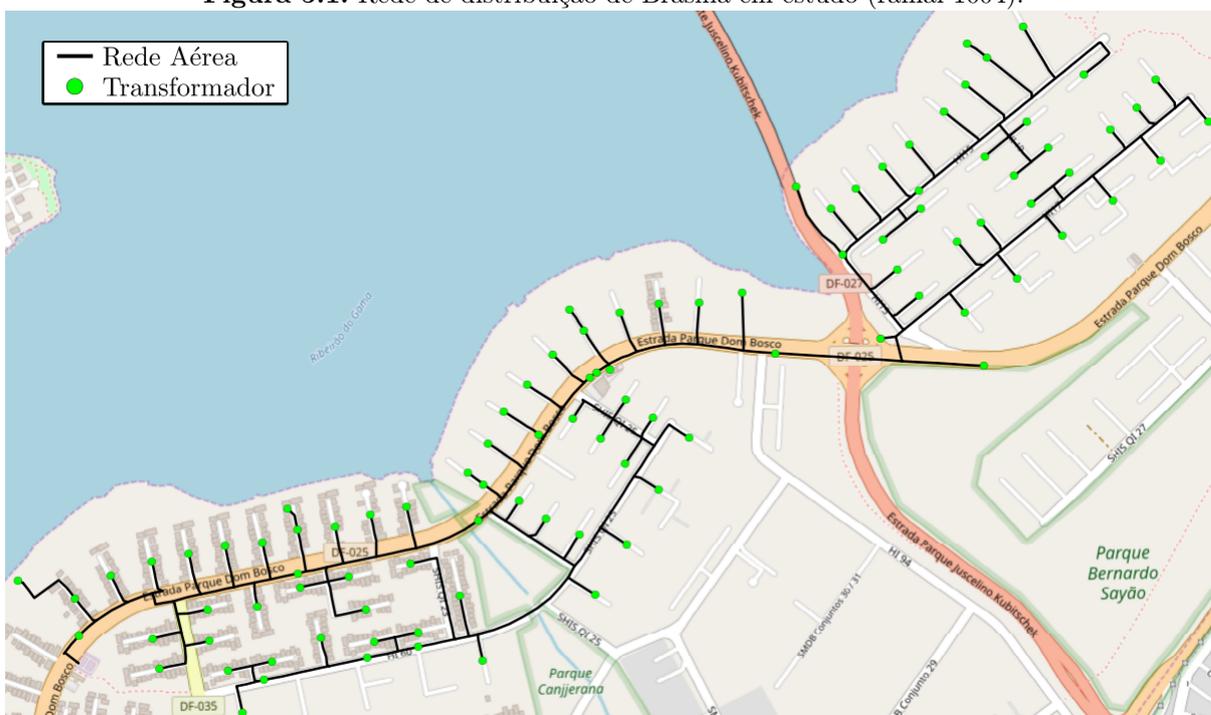
**Script 4.6.** Código máscara para motores trifásicos.

```
1 //Pot ncia demandada em regime [kVA]
2 pot_elevator = POT_inst_elevator * p_elevator *1e-3;
3 textbf{//Tens o de linha nominal em kV_{rms}}
4 Vll_nominal = sqrt(3)*V_base*1e-3;
5 if(pot_elevator > 0)
6 {flag_elevator = -1;}
7 else{flag_elevator = 1; pot_elevator = 1;}
8 //Velocidade s ncrona do elevador
9 wn_elevator= (120*Freq)/ (npoles_elevator);
10 slip_elevator = 0.01396059;
11 slip_pump= 0.0151887729;
12 //Velocidade nominal do elevador
13 speed_elevator= 1-slip_elevator;
```

## 5.1 DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A rede de distribuição a ser estudada é um alimentador aéreo real da Neoenergia, em Brasília, apresentado em (TOLEDO, 2019). A rede foi nomeada como ramal 1004, pois é o quarto circuito da subestação 10. O alimentador tem característica radial, com cabos de alumínio CA na configuração convencional e compacta. A tensão de linha primária nominal é de  $13,8 \text{ kV}_{rms}$  e frequência de operação de 60 Hz. Fez-se a transposição do ramal simulado no *software* ATP em (TOLEDO, 2019) para o *software* EMTP com algumas modificações de forma a diminuir os tempos de simulação. A Figura 5.1 representa o ramal real em estudo no mapa de Brasília.

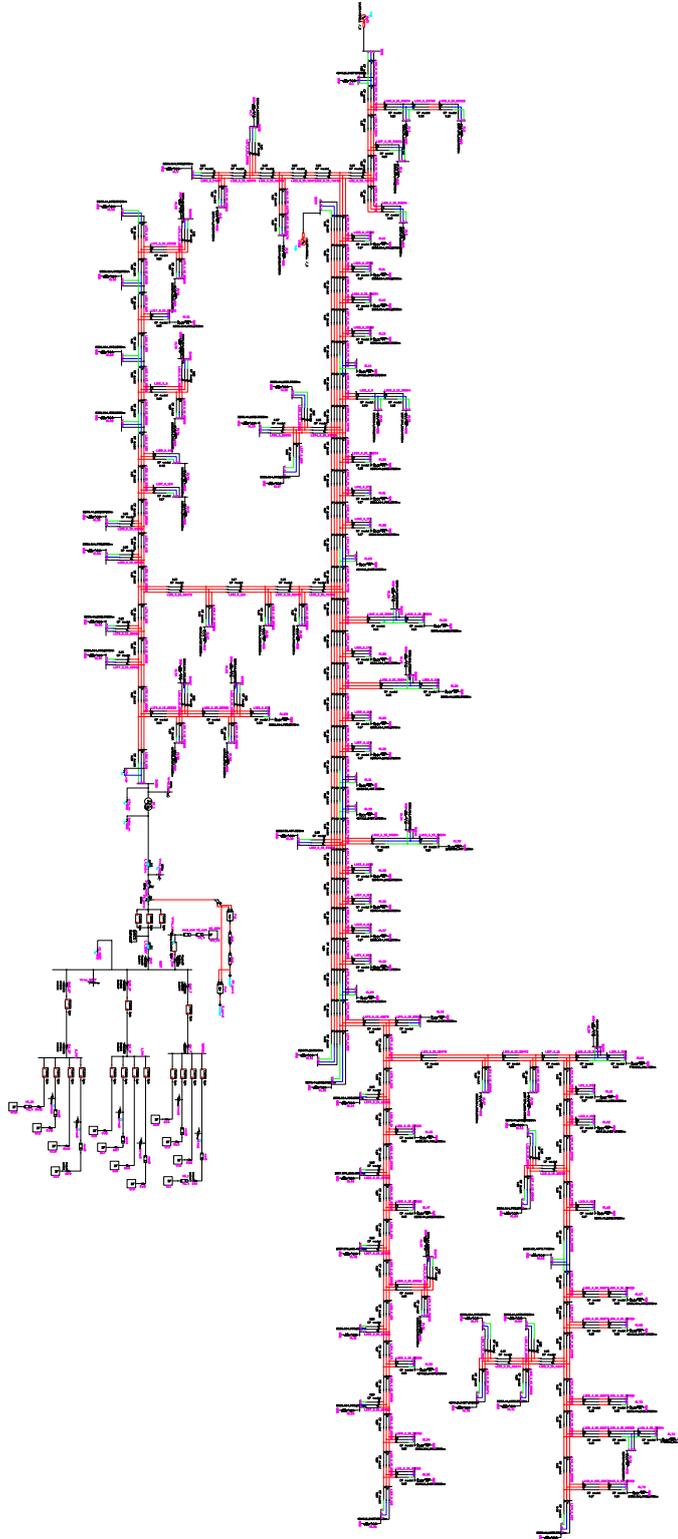
**Figura 5.1.** Rede de distribuição de Brasília em estudo (ramal 1004).



Fonte: (TOLEDO, 2019).

A Figura 5.2 representa o ramal 1004 da Figura 5.1 transposto para o *software* EMTP.

**Figura 5.2.** Rede de distribuição implementada no *software* EMTP.



**Fonte:** autoria própria.

Conforme exposto, pretende-se analisar o efeito de distúrbios elétricos a partir do regime

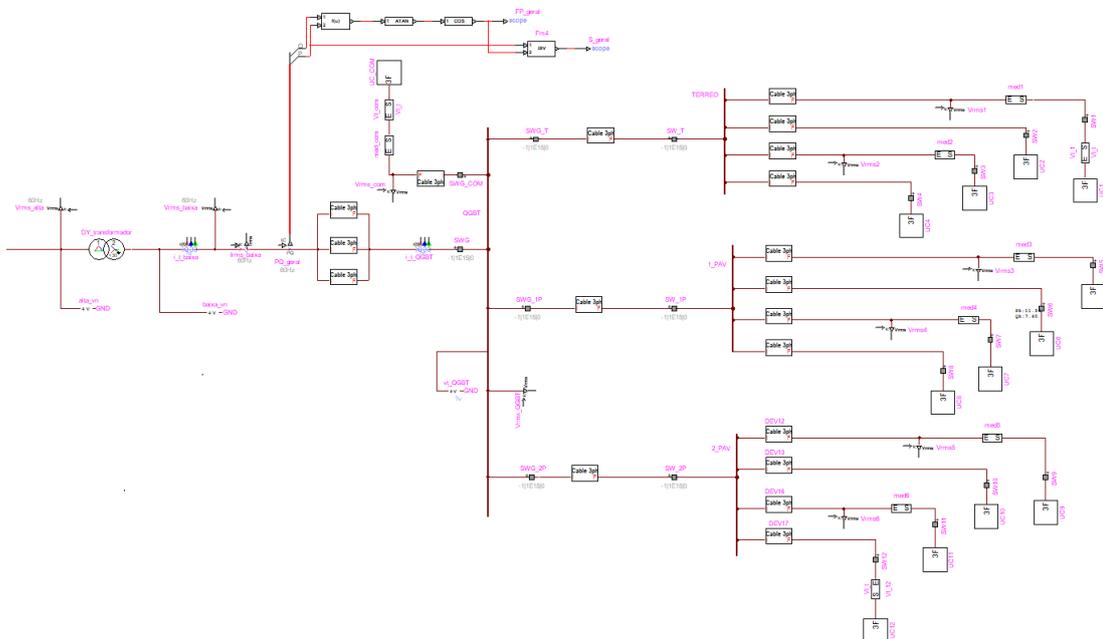
permanente que representa as condições nominais de operação do sistema. Logo, devido ao período de partida e inicialização do modelo para unidades consumidoras apresentado no Capítulo 4, utilizou-se o modelo de linha com parâmetros constantes com mesmo arranjo de condutores apresentado em (TOLEDO, 2019). Alteraram-se os comprimentos das linhas em que o atraso de propagação era menor do que o passo de tempo da simulação ( $\Delta t = 0,5 \mu s$ ). Dessa forma, o menor atraso de propagação em uma linha é de  $\tau > 0,5 \mu s$ .

Aumentaram-se as tensões de linha das fontes de alimentações para  $14,37 \text{ kV}_{rms}$  de maneira que o ponto de entrega no secundário do transformador seja  $380/220 \text{ V}_{rms}$ .

## 5.2 DESCRIÇÃO GERAL DO CONDOMÍNIO

O condomínio residencial em estudo é composto por um prédio de três pavimentos com quatro apartamentos por andar, totalizando doze apartamentos (“UC1 - UC12”). O condomínio dispõe de um quadro para cargas da área comum, tais como iluminação e elevador (“UC\_COM”). O modelo do condomínio no EMTP pode ser visto na Figura 5.3.

**Figura 5.3.** Modelo do condomínio residencial em estudo.



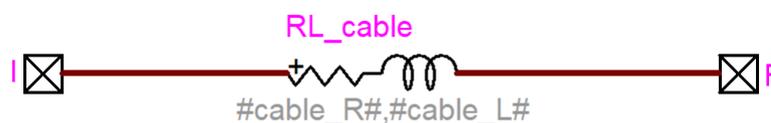
**Fonte:** autoria própria.

Definiu-se a potência nominal do transformador trifásico como 300 kVA, pois é o menor valor comercial que atende o pior caso de demanda (cenário Noite,  $S < 275 \text{ kVA}$ ). O transformador

trifásico possui tensão nominal de  $13,8/0,38 \text{ kV}_{rms}$  e segue o esquema de ligação  $\Delta - Yg$  com impedância de 4,5% (WEG, 2023).

Os condutores trifásicos foram modelados nos blocos “Cable 3ph” como uma resistência e um indutor em série (Figura 5.4). As impedâncias dos cabos são definidas em códigos máscara para cada bloco de condutores. Ademais, a impedância nominal dos cabos relaciona a secção do condutor com o seu respectivo comprimento. A secção e o número de condutores foram simulados no software gratuito do fabricante Prysmian (“DCE BAIXA”). Por fim, utilizaram-se os valores das resistências e reatâncias CA [ $\Omega/\text{km}$ ] de cada condutor EPROTENAX unipolar 0,6/1 kV com secções transversais até  $95 \text{ mm}^2$ , disponível no *software* (“DCE BAIXA”).

**Figura 5.4.** Modelo dos condutores trifásicos do condomínio em estudo.



**Fonte:** autoria própria.

### 5.3 CENÁRIOS DE CARREGAMENTO

Criaram-se quatro cenários de carregamento para as unidades consumidoras (UC1-UC12 e UC\_COM), sendo eles: manhã, tarde, noite e indutivo. Todas as tabelas que caracterizam os cenários de carregamento podem ser encontradas nos Anexos A, B, C e D, representando os cenários manhã, tarde, noite e indutivo, respectivamente.

Dessa forma, os cenários de carregamento descritos nos anexos definem a potência demandada como um percentual da potência instalada para cada componente de carga modelado no Capítulo 4.

A potência instalada declarada de cada apartamento consiste nos equipamentos da Tabela 5.1. Já para o quadro de cargas comuns (“UC\_COM”), a potência instalada declarada consiste nos equipamentos das Tabelas 5.2 e 5.3.

O tipo de carga considerado para cada equipamento é apresentado na coluna “Modelo” das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3

Tabela 5.1. Declaração de carga para cada apartamento.

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_COOKING	Forno elétrico	3	1	3
	Torradeira	0,8	1	0,8
RES_SP_HEAT	Ferro elétrico	1	1	1
	Secador de cabelo	1	1	1
RES_WT_HEAT	Chuveiro	5,5	2	11
SMPS_PC	Computador	0,3	2	0,6
SMPS_TV	Televisão	0,28	2	0,56
ILUM_LED	Lâmpadas LED	0,5	1	0,5
MOTOR_MONO	Máquina de Lavar	0,55	1	0,55
	Geladeira	0,38	1	0,38
	Ar-condicionado 10000 BTU	1,2	3	3,6
	Aspirador de pó	0,6	1	0,6
	Exaustor	0,15	1	0,15

**Fonte:** autoria própria.

Tabela 5.2. Declaração de carga para quadro da área comum (UC\_COM).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_WT_HEAT	Chuveiro	5,5	1	5,5
SMPS_PC	Computador	0,3	2	0,6
SMPS_TV	Televisão	0,28	1	0,28
ILUM_CFL	Lâmpadas fluorescentes	1,2	1	1,2
MOTOR_MONO	Geladeira e freezer	0,58	1	0,58
	Ar-condicionado 18000 BTU	2,4	1	2,4
	Motor do portão	0,93	1	0,93

**Fonte:** autoria própria.

Tabela 5.3. Declaração de carga dos motores trifásicos da área comum (UC\_COM).

Modelo	Equipamento	Pot. [kVA]	Qtd. [un]	Pot. total [kVA]
ELEVATOR_3PH	Elevador	10,19	1	10,19
PUMP_3PH	Bomba	4,7	1	4,7

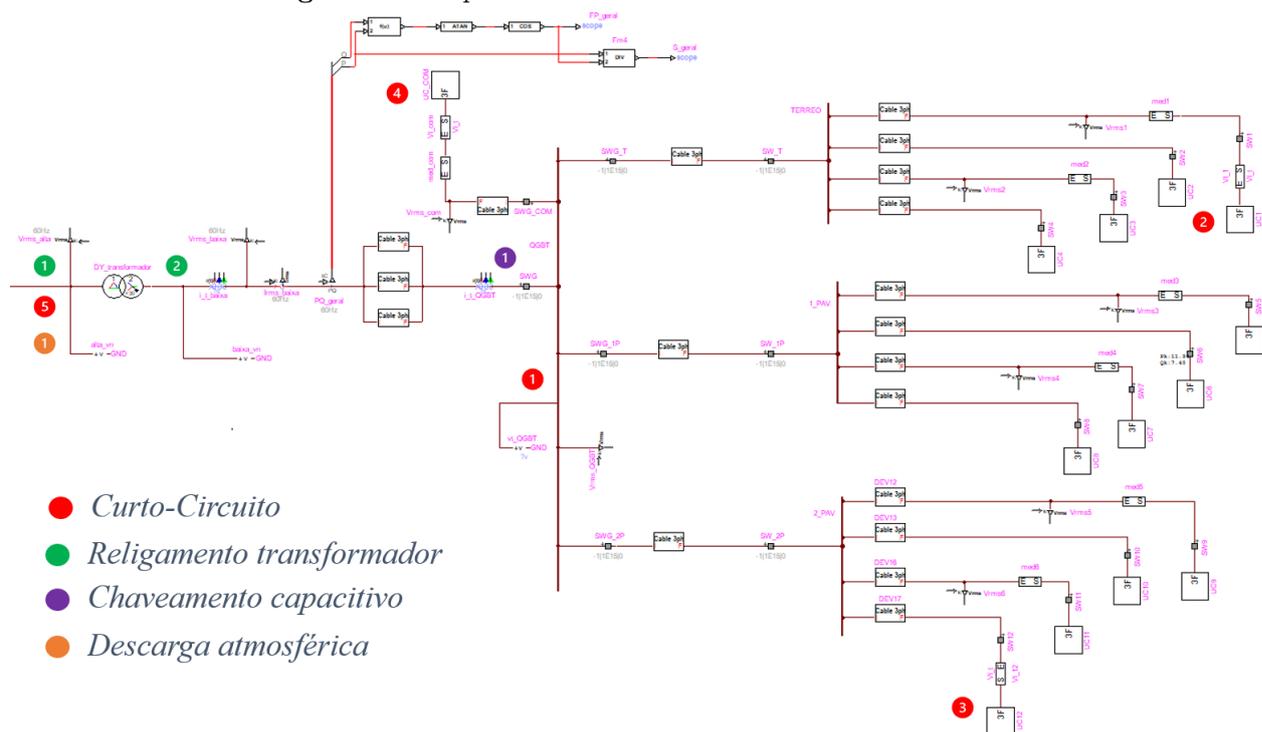
**Fonte:** autoria própria.

Definiram-se as potências demandadas dos motores trifásicos da Tabela 5.3 por meio da Tabela 9 de NOR.DISTRIBU-ENGE-0022 (NEOENERGIA, 2017), a qual relaciona a potência mecânica no eixo [cv] e número de motores. Para o condomínio, escolheram-se motores de 7,5 cv e de 3 cv para o elevador e bomba d'água, respectivamente.

## 5.4 ANÁLISE DE DISTÚRBIOS NA REDE ELÉTRICA

Analisaram-se quatro tipos de distúrbios ao longo do condomínio e do ramal de alimentação em estudo, dentre eles: curto-circuito monofásico; surtos de religamento do transformador; chaveamento capacitivo e descargas atmosféricas. As Figuras 5.5 e 5.6 representam os mapas-chave dos pontos em que foram aplicados os distúrbios no condomínio e no ramal, respectivamente.

**Figura 5.5.** Mapa chave do local dos distúrbios no condomínio.



**Fonte:** autoria própria.

Os pontos onde foram simulados curtos-circuitos estão indicados na cor vermelha, sendo eles: 1 - barramento do quadro geral de baixa tensão (“QGBT”), 2 - entrada da primeira unidade consumidora (“UC1”), localizada no pavimento térreo; 3 - entrada da última unidade consumidora (“UC12”), localizada no segundo pavimento; 4 - entrada do quadro da área comum

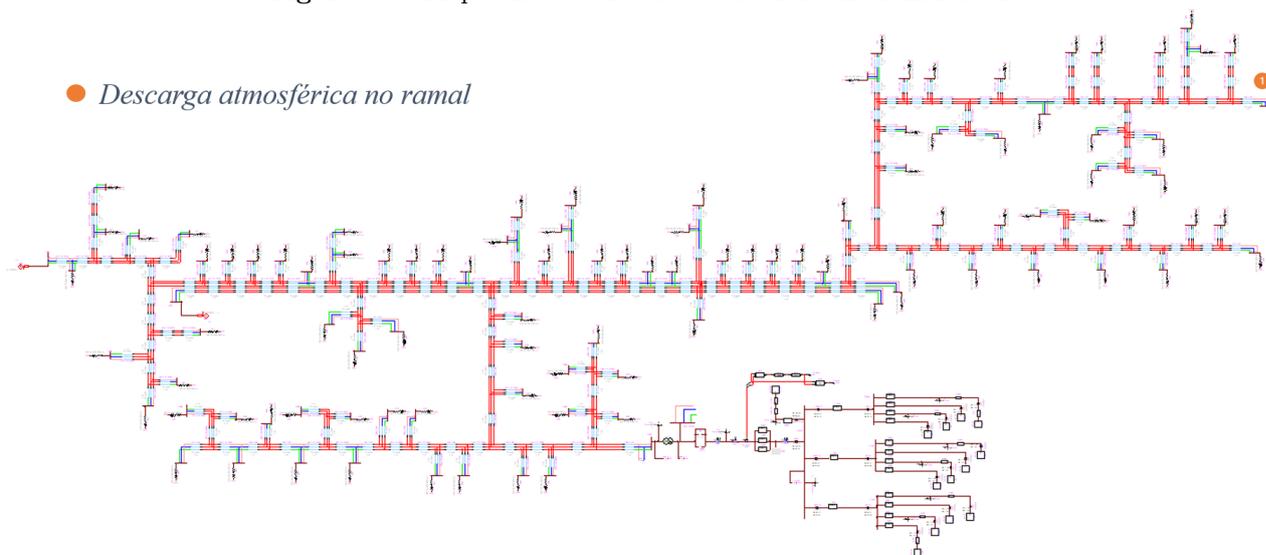
(“UC\_COM”), localizado ao lado do “QGBT” no pavimento térreo; 5 - enrolamento primário do transformador.

Os pontos onde foram simulados surtos de religamento do transformador estão indicados na cor verde, sendo eles: 1 - desligamento e religamento do primário do transformador, 2 - desligamento e religamento do secundário do transformador

O ponto onde foi simulado o chaveamento capacitivo está indicado na cor roxa, localizado na entrada no quadro “QGBT”.

Os pontos onde foram simuladas descargas atmosféricas estão indicados na cor laranja, localizados no primário do transformador e no ponto indicado no ramal da Figura 5.6.

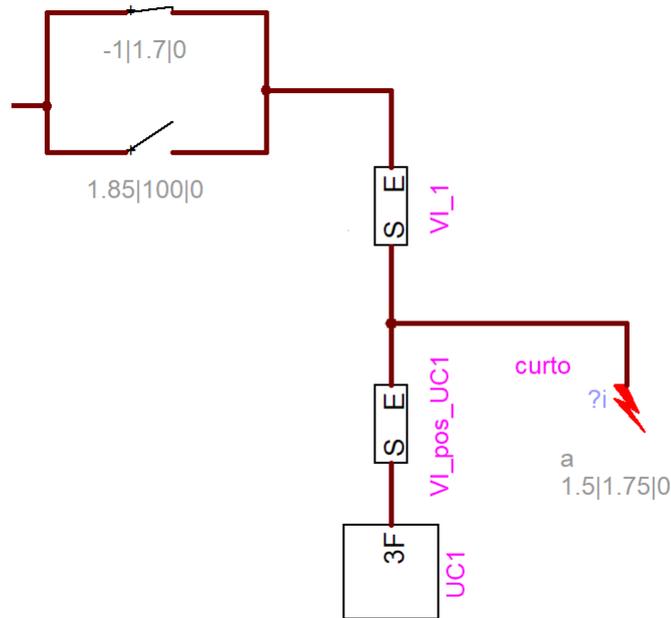
**Figura 5.6.** Mapa chave do local dos distúrbios no ramal 1004.



**Fonte:** autoria própria.

#### 5.4.1 Ocorrência de curtos-circuitos

Os curtos-circuitos indicados na Figura 5.5 são monofásicos na fase A. Para cada simulação de curto, o esquema da Figura 5.7 foi implementado nas unidades consumidoras em curto.

**Figura 5.7.** Esquema montado para estudo de curto-circuito.

**Fonte:** autoria própria.

A Figura 5.7 indica que o curto se inicia no instante  $t = 1,5$  s. No instante  $t = 1,7$  s, uma chave ideal de proteção abre e desenergiza a unidade consumidora. Por outro lado, no instante  $t = 1,75$  s, o curto-circuito é extinto. Por fim, no instante  $t = 1,85$  s, a unidade consumidora é reconectada ao sistema. Os blocos “VI\_1” e “VI\_pos\_UC1” são amperímetros que medem as contribuições de corrente, da rede e da unidade consumidora, ao ramo em curto.

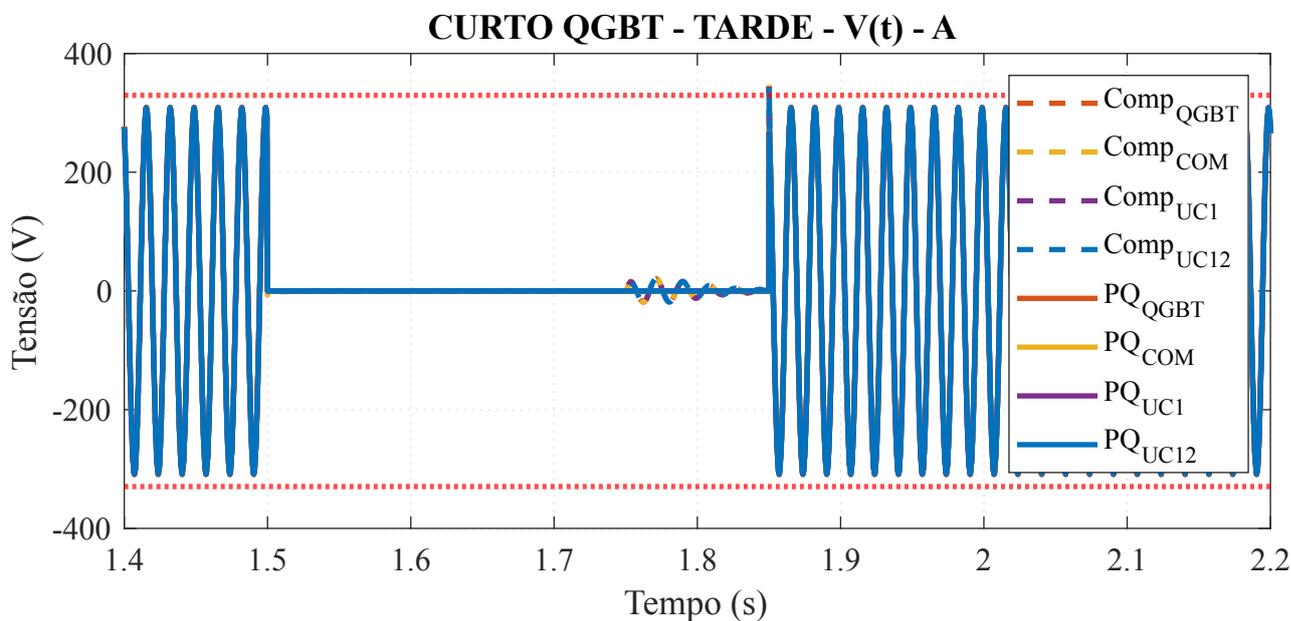
#### 5.4.1.1 Análise de resultados

Os curtos-circuitos foram simulados nos cenários manhã, tarde e noite em todos os pontos indicados na Figura 5.5 para o modelo de impedância constante (PQ) e para o modelo a componentes. Monitoraram-se as tensões e correntes no domínio do tempo para os seguintes pontos do condomínio: enrolamento secundário do transformador; barramento do QGBT; quadro de área comum (“UC\_COM”); primeira unidade consumidora (“UC1”); última unidade consumidora (“UC12”).

As Figuras 5.8 e 5.9 representam a fase A em curto e a fase C, respectivamente. Nos instantes em que o curto está ativo, quando  $1,5 \text{ s} \leq t \leq 1,75 \text{ s}$ , não há sobretensões relevantes.

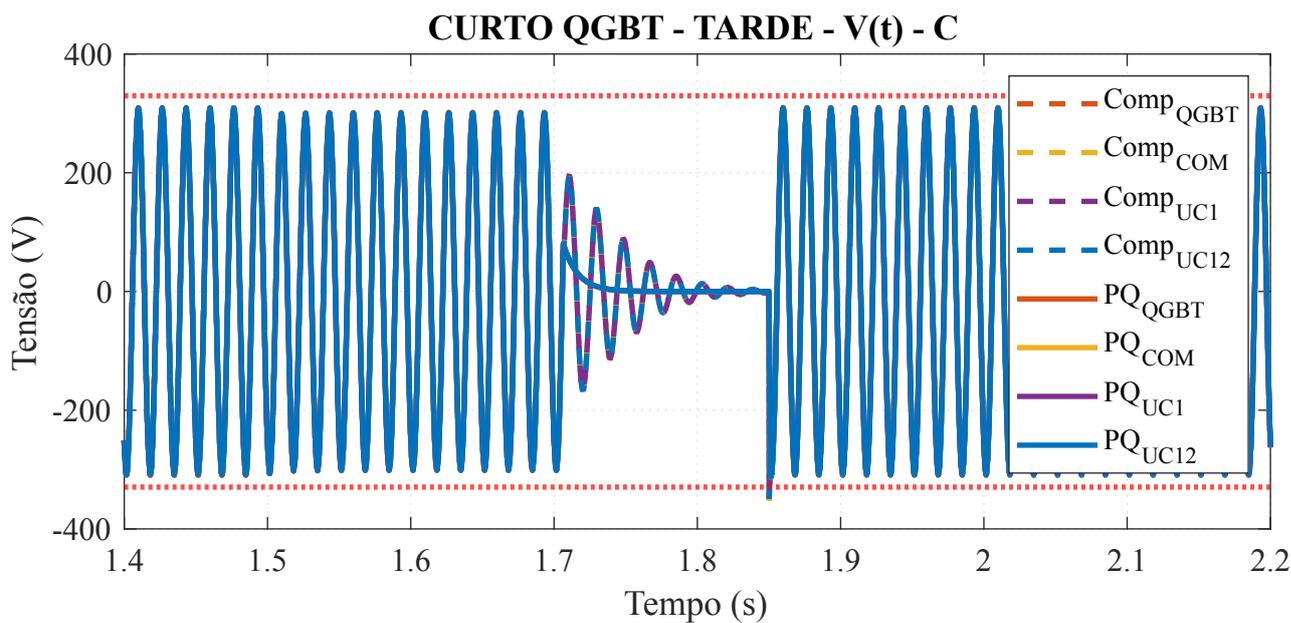
A linha constante em vermelho da Figura 5.8 representa o valor de pico para uma tensão considerada como crítica pela agência reguladora ANEEL ( $V_{critico} > 233V_{rms}$ )(ANEEL, 2017a).

Figura 5.8. Tensão na fase em curto do QGBT.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.9. Tensão de alimentação da fase C nas unidades consumidoras.

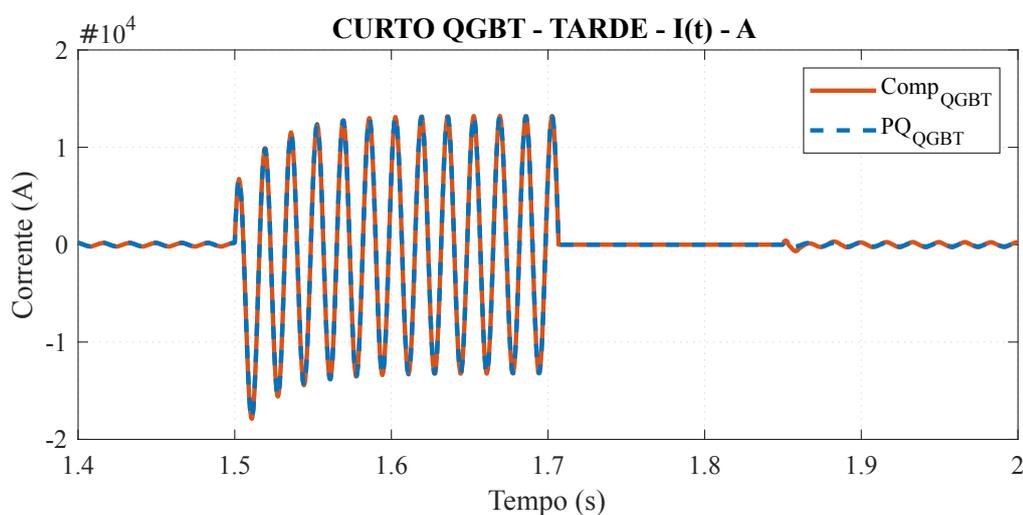


Fonte: autoria própria.

Verificam-se na Figura 5.9 que as tensões do modelo PQ no desligamento, quando  $1,7 \text{ s} \leq t \leq 1,85 \text{ s}$ , decaem de maneira exponencial, característica de elementos indutivos. No entanto, no modelo a componente, as tensões decaem de maneira subamortecida com uma envoltória exponencial.

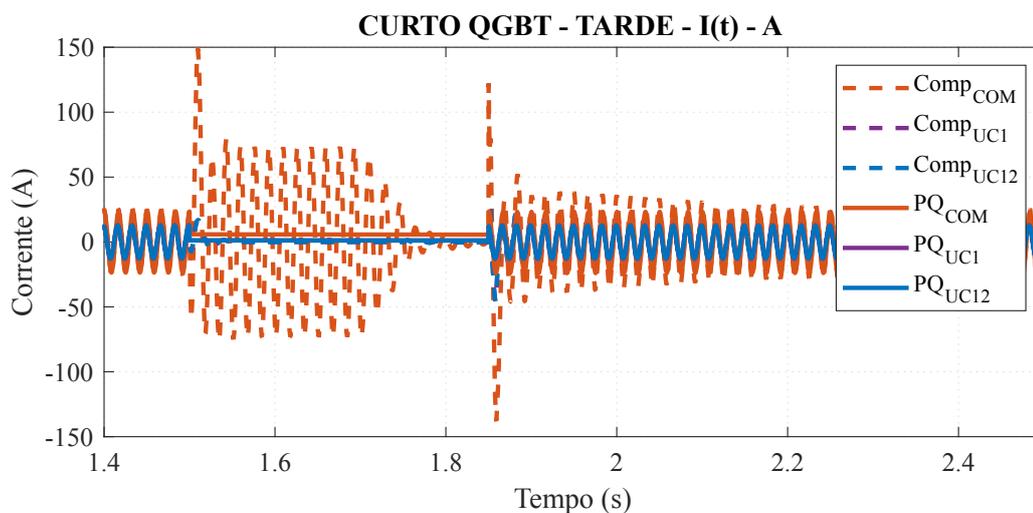
As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam as contribuições de corrente da rede e de corrente das unidades consumidoras, respectivamente. Concluem-se que para os dois modelos, a maior contribuição de corrente é proveniente da rede.

**Figura 5.10.** Contribuição de corrente ao ramo de falta proveniente da rede.



**Fonte:** autoria própria.

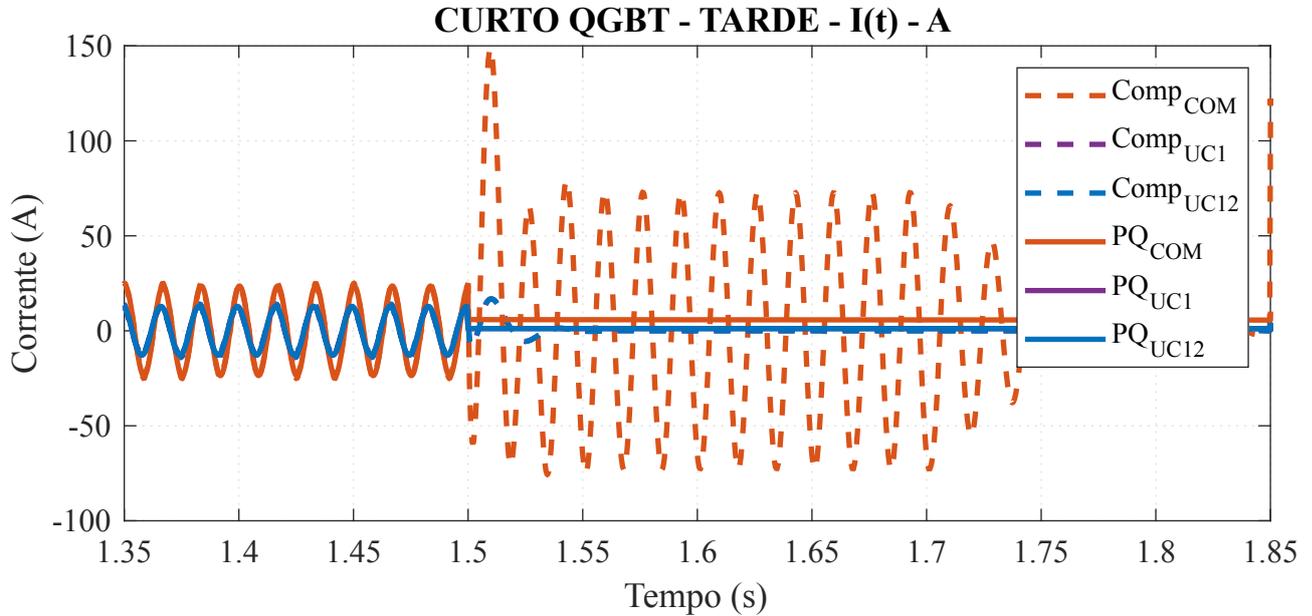
**Figura 5.11.** Contribuição de corrente ao ramo de falta proveniente das unidades consumidoras.



**Fonte:** autoria própria.

Evidenciaram-se na Figura 5.12, as diferenças entre as correntes de contribuições das unidades consumidoras nos modelos PQ e a componente, quando  $1,7 \text{ s} \leq t \leq 1,85 \text{ s}$ . Identificaram-se as inversões e sobrecorrentes do modelo a componente no instante  $t = 1,5 \text{ s}$ .

**Figura 5.12.** Contribuição de corrente ao ramo de falta das unidades consumidoras, durante curto.



**Fonte:** autoria própria.

Calcularam-se, para cada cenário, os aumentos transitórios percentuais relacionando corrente e tensão máximas com seus respectivos valores nominais em regime permanente. Constataram-se, com os valores percentuais, que o cenário que produziu as maiores sobrecorrentes foi o curto-circuito no QGBT durante o cenário Tarde, devido à maior relevância da potência de motores em relação à potência demandada. Já o caso que gerou menores sobrecorrentes foi o curto na “UC12” no cenário noite.

Verificaram-se que o modelo a componente produz sobrecorrentes em todas unidades consumidoras conectadas em todos os cenários simulados. Por outro lado, o modelo PQ produz sobrecorrentes apenas na unidade consumidora em curto e no quadro QGBT.

Compararam-se os aumentos transitórios percentuais do modelo PQ e do modelo a componente e constataram-se que todos sinais monitorados tiveram um aumento percentual maior no modelo a componente. A tabela 5.4 apresenta os maiores valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão no QGBT em curto e a Tabela 5.5 apresenta os maiores valores percentuais de

sobrecorrente e sobretensão no quadro da área comum “UC\_COM” com o QGBT em curto.

**Tabela 5.4.** Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão no QGBT dos modelos em estudo no cenário Tarde.

QGBT - $I_a$		QGBT - $V_b$	
corrente PQ [%]	corrente Comp [%]	tensão PQ [%]	tensão Comp [%]
10142,64	9248,21	100,84	100,35

Fonte: autoria própria.

**Tabela 5.5.** Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão no quadro UC\_COM dos modelos em estudo no cenário Tarde.

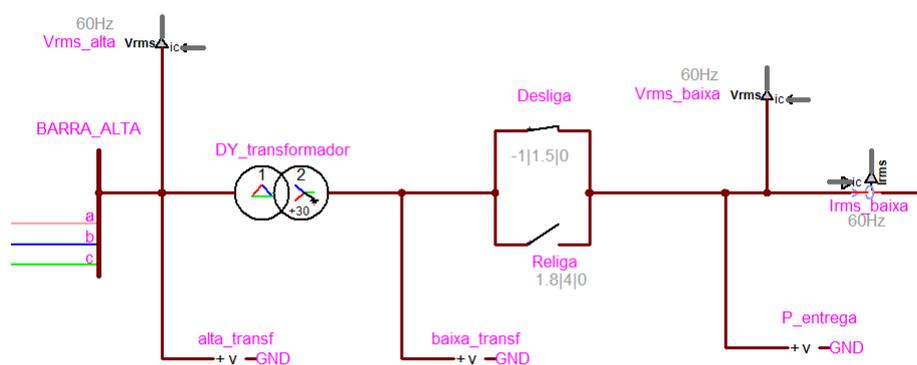
UC_COM - $I_a$		UC_COM - $V_b$	
corrente PQ [%]	corrente Comp [%]	tensão PQ [%]	tensão Comp [%]
99,48	589,73	100,84	100,32

Fonte: autoria própria.

#### 5.4.2 Surtos de religamento

O esquema da Figura 5.13 foi implementado para cada simulação de surto de religamento nos pontos indicados da Figura 5.5.

**Figura 5.13.** Esquema montado para estudo de religamento do transformador.



Fonte: autoria própria.

A Figura 5.13 indica que o transformador é desligado no instante  $t = 1,5$  s pela chave ideal “Desliga” enquanto no instante  $t = 1,8$  s o transformador é religado por uma chave ideal “Religa”.

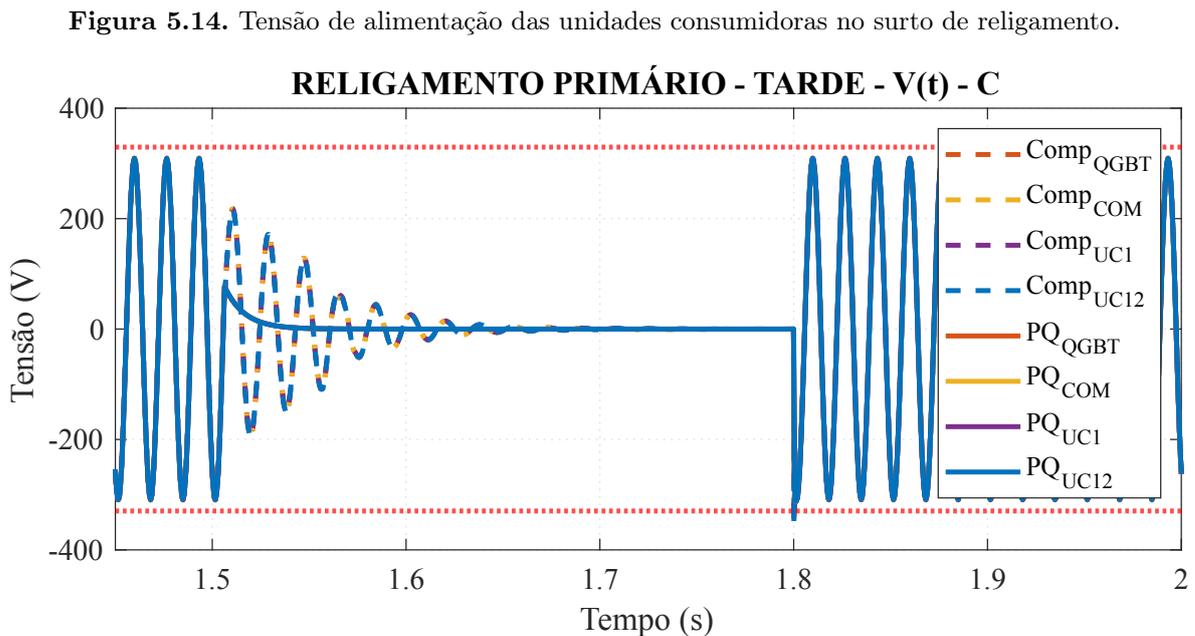
### 5.4.2.1 Análise de resultados

Os surtos de religamento no primário e secundário do transformador foram simulados nos cenários manhã, tarde e noite para o modelo de impedância constante (PQ) e para o modelo a componentes. Monitoraram-se as tensões e correntes no domínio do tempo para os seguintes pontos do condomínio: enrolamento secundário do transformador; barramento do QGBT; quadro de área comum (“UC\_COM”); primeira unidade consumidora (“UC1”); última unidade consumidora (“UC12”).

Nos instante do desligamento,  $1,5 \text{ s} \leq t \leq 1,8 \text{ s}$ , as diferenças entre os modelos PQ e a componente estão representadas nas Figuras 5.14 e 5.16.

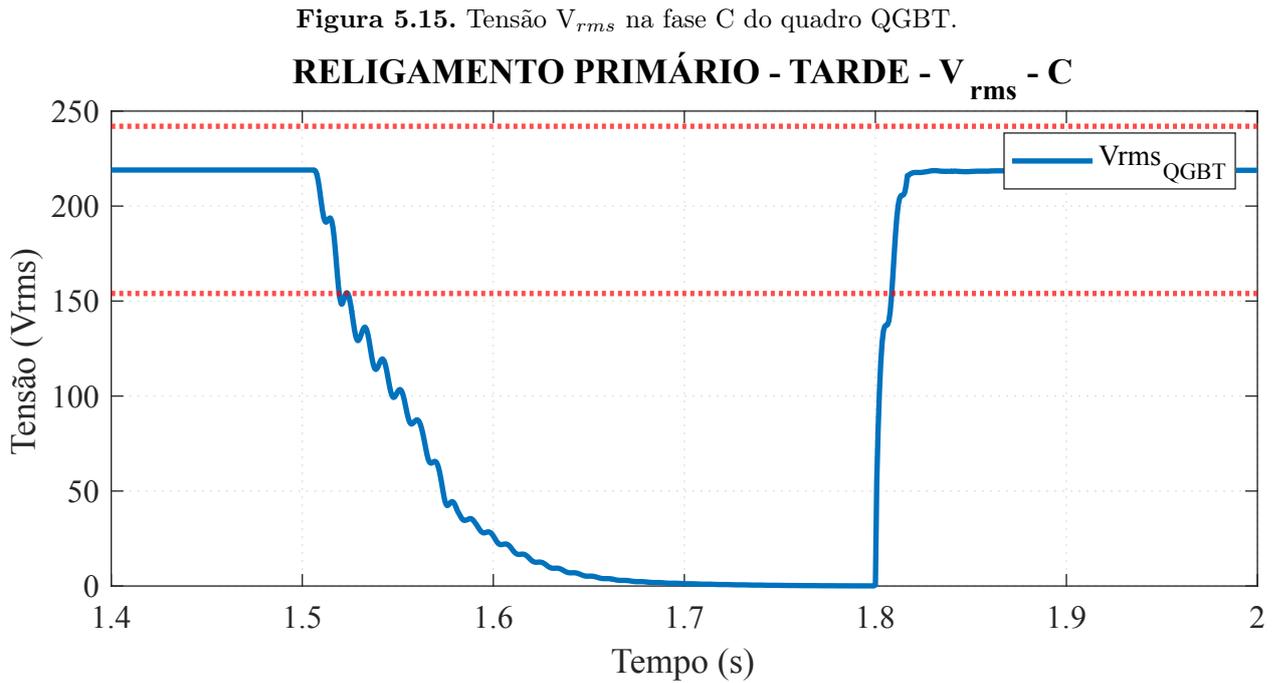
Verificaram-se na Figura 5.14 que as tensões do modelo PQ, no desligamento, decaem de maneira exponencial, característico de elementos indutivos. Em contrapartida, no modelo a componente, as tensões decaem de maneira subamortecida com uma envoltória exponencial. Mediu-se o valor  $V_{rms}$  no QGBT na Figura 5.15 a fim de se identificar se esse decaimento subamortecido pertence à região sujeita a mau funcionamento ou desligamento por afundamento de tensão da curva ITIC, apresentada na Subseção 2.3.

A linha constante em vermelho da Figura 5.14 representa o valor de pico para uma tensão considerada como crítica pela agência reguladora ANEEL ( $V_{critico} > 233 V_{rms}$ ) (ANEEL, 2017a).



**Fonte:** autoria própria.

As linhas em vermelho na Figura 5.15, representam os valores de 0,7 e 1,1 pu definidos na curva ITIC, Figura 2.3. Como a tensão  $V_{rms}$  permanece abaixo do nível 0,7 pu, indicado em vermelho, o condomínio se encontra na região de mau funcionamento ou desligamento por afundamento de tensão da curva ITIC.

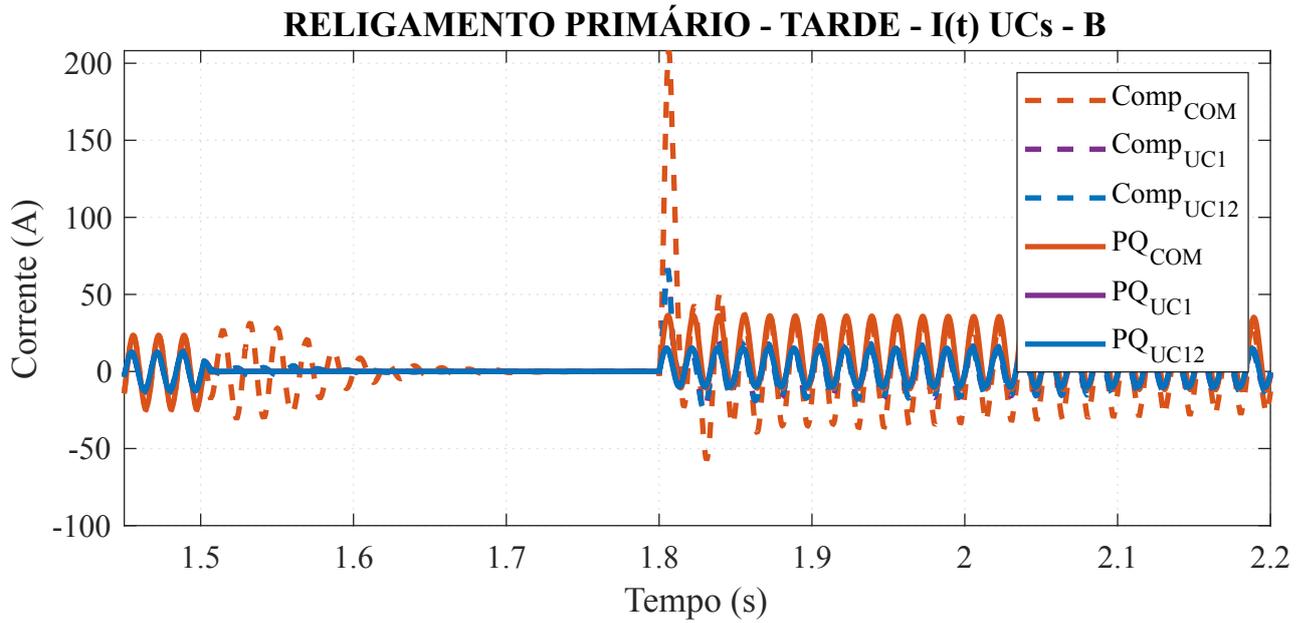


**Fonte:** autoria própria.

Observaram-se na Figura 5.16, que as correntes das unidades consumidoras modeladas a componente, no desligamento, não decaem a zero na mesma velocidade das unidades no modelo PQ. Ademais, identificaram-se sobrecorrentes transitórias no quadro de área comum (“UC\_COM”) após seu desligamento, principalmente devido à presença de motores trifásicos.

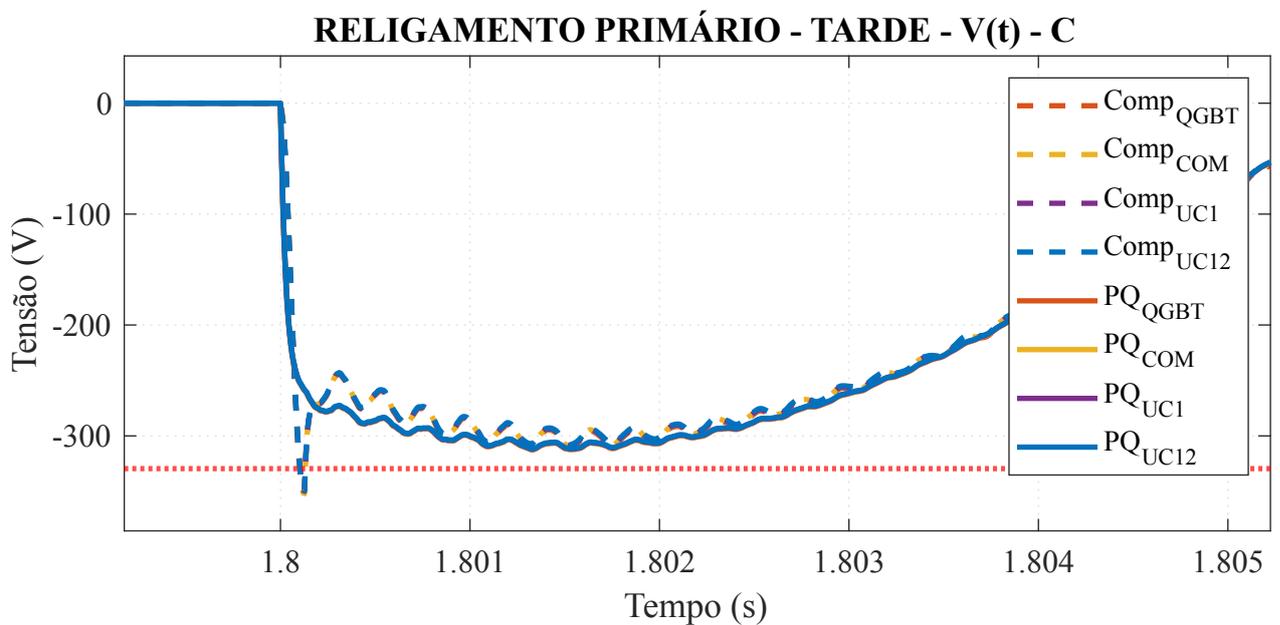
Já no instante de religamento,  $t \geq 1,8$  s, as diferenças entre os modelos PQ e a componente estão representadas Figuras 5.17 e 5.18. Verificaram-se na Figura 5.17 que só há sobretensão, apesar de curta duração, no modelo a componente no cenário Tarde. A Figura 5.18 demonstra que as sobrecorrentes transitórias do modelo a componente são mais relevantes do que as do modelo PQ.

**Figura 5.16.** Correntes das unidades consumidoras no surto de religamento.

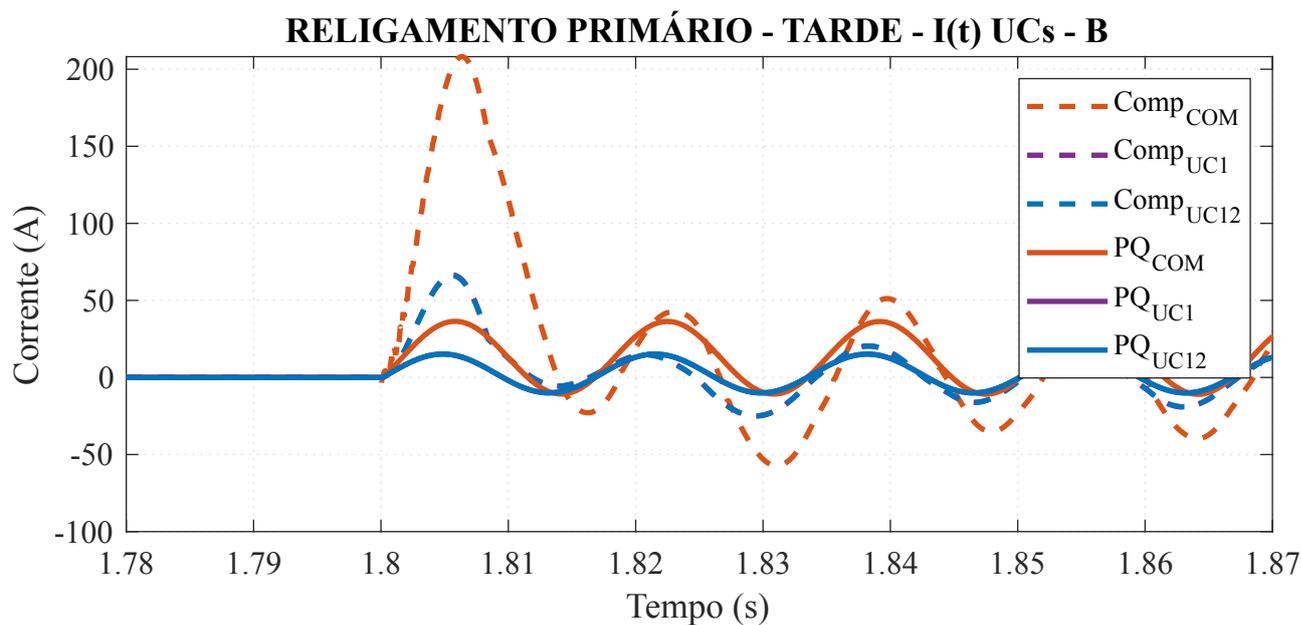


Fonte: autoria própria.

**Figura 5.17.** Tensão de alimentação das unidades consumidoras no momento do chaveamento capacitivo.



Fonte: autoria própria.

**Figura 5.18.** Correntes das unidades consumidoras no momento do chaveamento capacitivo.

**Fonte:** autoria própria.

Calcularam-se os aumentos transitórios percentuais relacionando corrente e tensão máximas com seus respectivos valores nominais em regime permanente para cada cenário simulado, e constataram-se que os valores percentuais obtidos do religamento do primário do transformador são bem semelhantes aos obtidos no religamento do seu secundário.

Verificaram-se que os maiores valores percentuais de sobretensão do modelo a componente ocorrem no cenário Tarde, devido à maior relevância da potência de motores em relação à potência demandada. Por outro lado, as maiores sobretensões do modelo PQ ocorrem cenário Noite, pois é o cenário com maior potência demandada.

Compararam-se os aumentos transitórios percentuais do modelo PQ e do modelo a componente e constataram-se que todos sinais monitorados tiveram um aumento percentual maior no modelo a componente. A tabela 5.6 apresenta os valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão comparando os dois modelos em estudo.

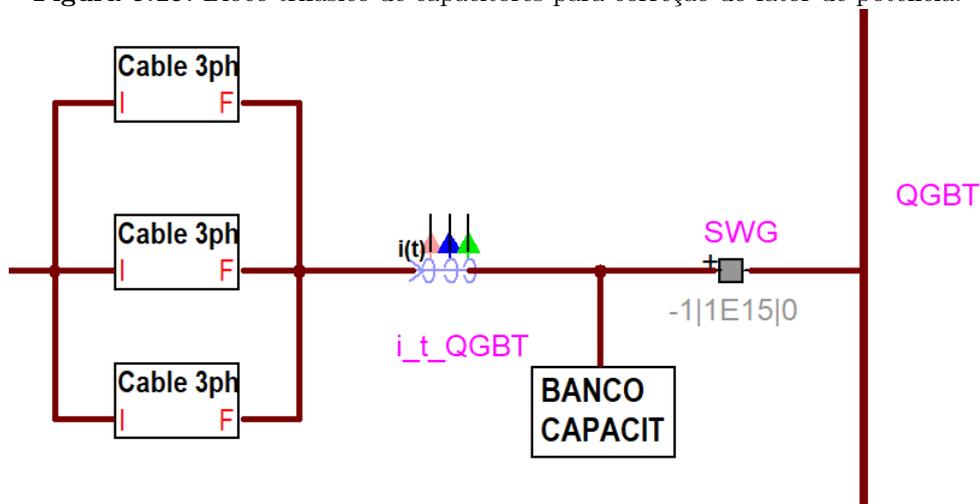
**Tabela 5.6.** Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão dos modelos em estudo no cenário Tarde.

UC COM - $I_b$		QGBT - $V_c$	
corrente PQ [%]	corrente Comp [%]	tensão PQ [%]	tensão Comp [%]
108,82	825,73	100,96	113,84

Fonte: autoria própria.

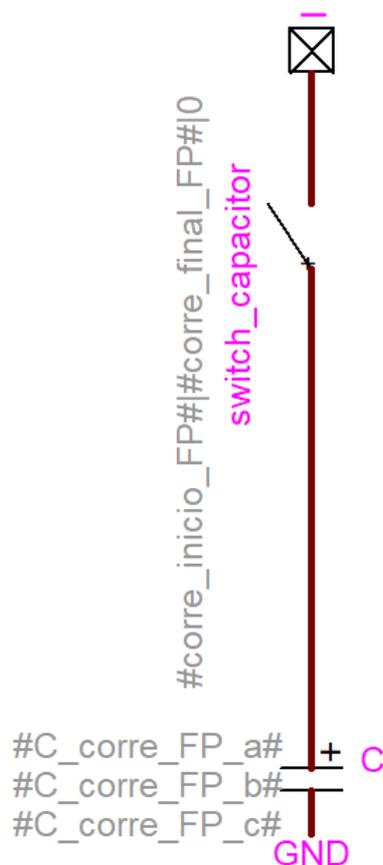
### 5.4.3 Chaveamento de banco de capacitores

A simulação implementada corrige o fator de potência geral no cenário Indutivo,  $fp = 0,85$  indutivo para  $fp = 0,93$  indutivo. Criou-se um bloco capacitivo trifásico, conectado em estrela (Y), controlado por código máscara. O bloco capacitivo é apresentado na Figura 5.19 e está conectado ao ponto indicado na Figura 5.5.

**Figura 5.19.** Bloco trifásico de capacitores para correção do fator de potência.

Fonte: autoria própria.

O código máscara controla os parâmetros da Figura 5.20 e possui como entrada as potências aparentes por fase, os fatores de potência por fase, o fator de potência alvo e os instantes de início e final de chaveamento.

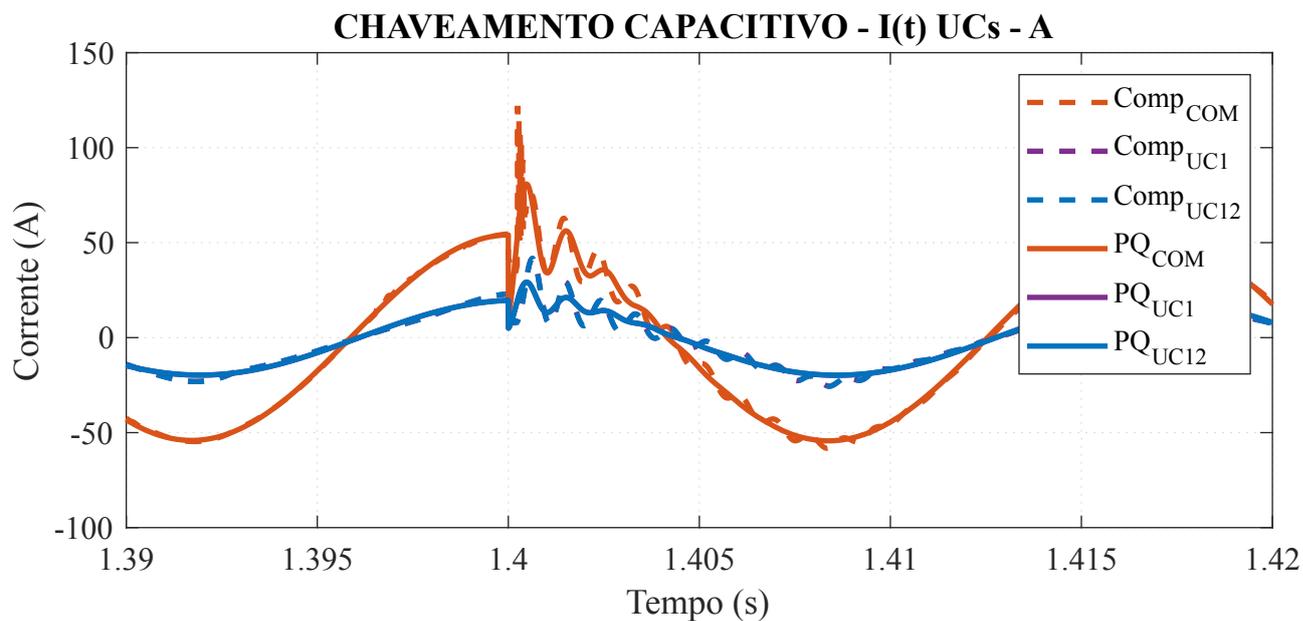
**Figura 5.20.** Circuito trifásico implementado pelo bloco “BANCO CAPACIT”.

**Fonte:** autoria própria.

### 5.4.3.1 Análise de resultados

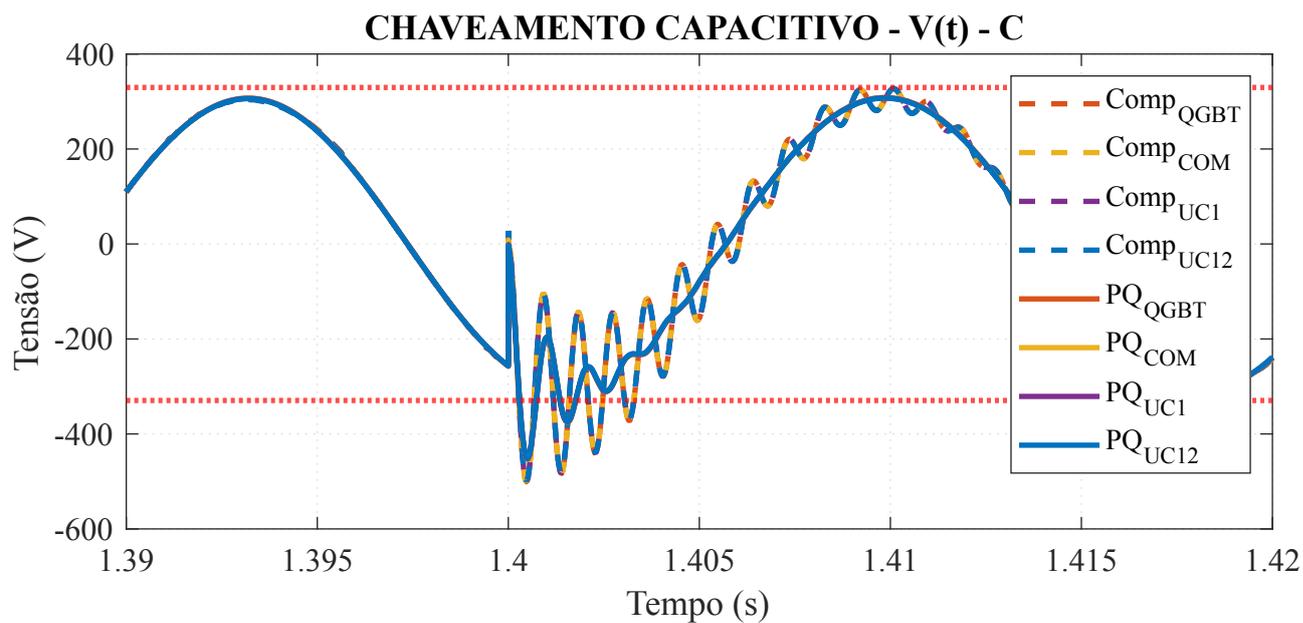
A correção do fator de potência foi simulada no cenário Indutivo para o modelo de impedância constante (PQ) e para o modelo a componentes. Monitoraram-se as tensões e correntes no domínio do tempo para os seguintes pontos do condomínio: enrolamento secundário do transformador; barramento do QGBT; quadro de área comum (“UC\_COM”); primeira unidade consumidora (“UC1”); última unidade consumidora (“UC12”).

Verificaram-se nas Figuras 5.21 e 5.22 que os dois modelos possuem sobrecorrentes e sobretensões transitórias no início do chaveamento do bloco capacitivo,  $1,4 \text{ s} \leq t < 1,7 \text{ s}$ . Em contrapartida, no instante em que se desconectou o bloco capacitivo, não houve sobrecorrentes ou sobretensões relevantes,  $t \geq 1,7 \text{ s}$ .

**Figura 5.21.** Correntes das unidades consumidoras no momento do chaveamento capacitivo.

**Fonte:** autoria própria.

A linha constante em vermelho da Figura 5.22 representa o valor de pico para uma tensão considerada como crítica pela agência reguladora ANEEL ( $V_{critico} > 233V_{rms}$ ) (ANEEL, 2017a).

**Figura 5.22.** Tensão de alimentação das unidades consumidoras no momento do chaveamento capacitivo.

**Fonte:** autoria própria.

Calcularam-se os aumentos transitórios percentuais relacionando corrente e tensão máximas com seus respectivos valores nominais em regime permanente. Verificaram-se que os maiores valores percentuais de sobretensão ocorrem no QGBT, devido à conexão do bloco capacitivo em sua na entrada. Por outro lado, a maior sobrecorrente verificada ocorre no quadro da área comum (“UC\_COM”).

Compararam-se os aumentos transitórios percentuais do modelo PQ e do modelo a componente e constataram-se que todos sinais monitorados tiveram um aumento percentual maior no modelo a componente. A tabela 5.7 apresenta os maiores valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão comparando os dois modelos em estudo.

**Tabela 5.7.** Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão nos modelos em estudo no cenário Indutivo.

UC_COM - $I_a$		QGBT - $V_c$	
corrente PQ [%]	corrente Comp [%]	tensão PQ [%]	tensão Comp [%]
149,56	222,84	147,61	164,17

**Fonte:** autoria própria.

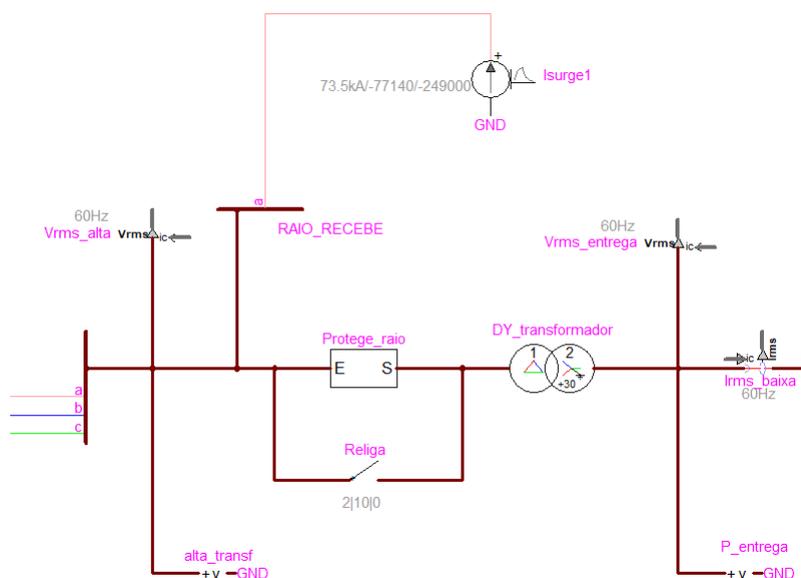
#### 5.4.4 Descargas atmosféricas

O esquema da Figura 5.23 foi implementado para cada simulação com descargas atmosféricas, mudando-se a aplicação do modelo de raio nos pontos indicados da Figura 5.5.

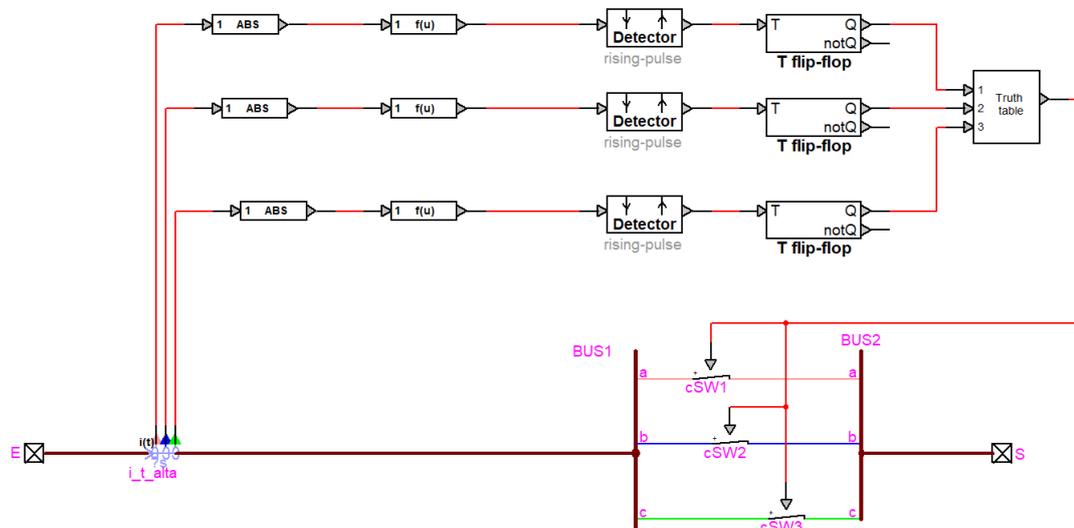
A fonte de corrente “I\_surge1” representa o modelo do raio considerado na Subseção 2.2.4. A fonte tem início no instante  $t = 1,5$  s.

O bloco “Protege\_raio” implementa o circuito da Figura 5.24, o qual mede a corrente no primário do transformador e identifica a existência de uma sobrecorrente que seja capaz de gerar 10 kA no secundário do transformador. No instante em que é identificada essa sobrecorrente, o sistema de controle desliga a alimentação do primário do transformador.

A chave “Religa” é acionada no instante  $t = 2$  s, religando a alimentação do condomínio.

**Figura 5.23.** Esquema montado para estudo com descargas atmosféricas.

Fonte: autoria própria.

**Figura 5.24.** Esquema montado para proteção de sobrecorrentes no modelo de descargas atmosféricas.

Fonte: autoria própria.

#### 5.4.4.1 Análise de resultados

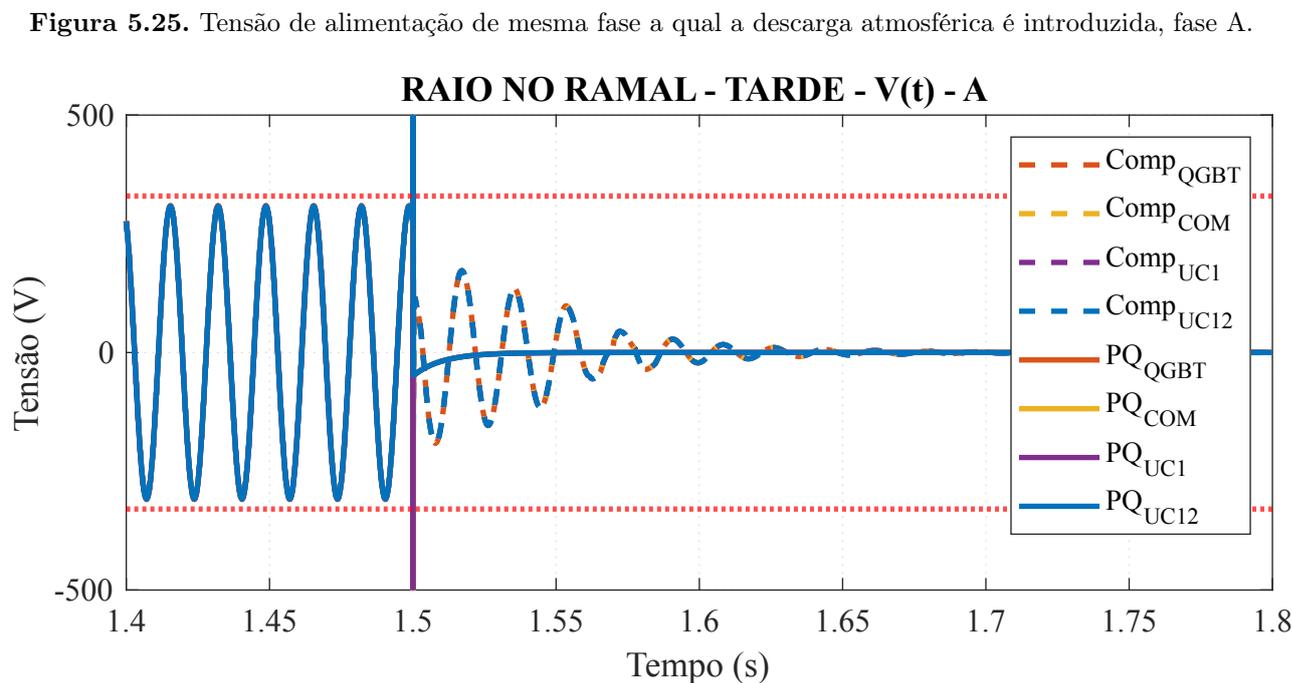
As descargas atmosféricas no primário do transformador e no ponto do ramal indicado na Figura 5.5 foram simuladas nos cenários manhã, tarde e noite para o modelo de impedância constante (PQ) e para o modelo a componentes. Monitoraram-se as tensões e correntes no domínio do tempo para os seguintes pontos do condomínio: enrolamento secundário do

transformador; barramento do QGBT; quadro de área comum (“UC\_COM”); primeira unidade consumidora (“UC1”); última unidade consumidora (“UC12”).

Nos instante em que a descarga atmosférica acontece,  $t = 1,5$  s, produziram-se sobretensões e sobrecorrentes em todos os pontos monitorados.

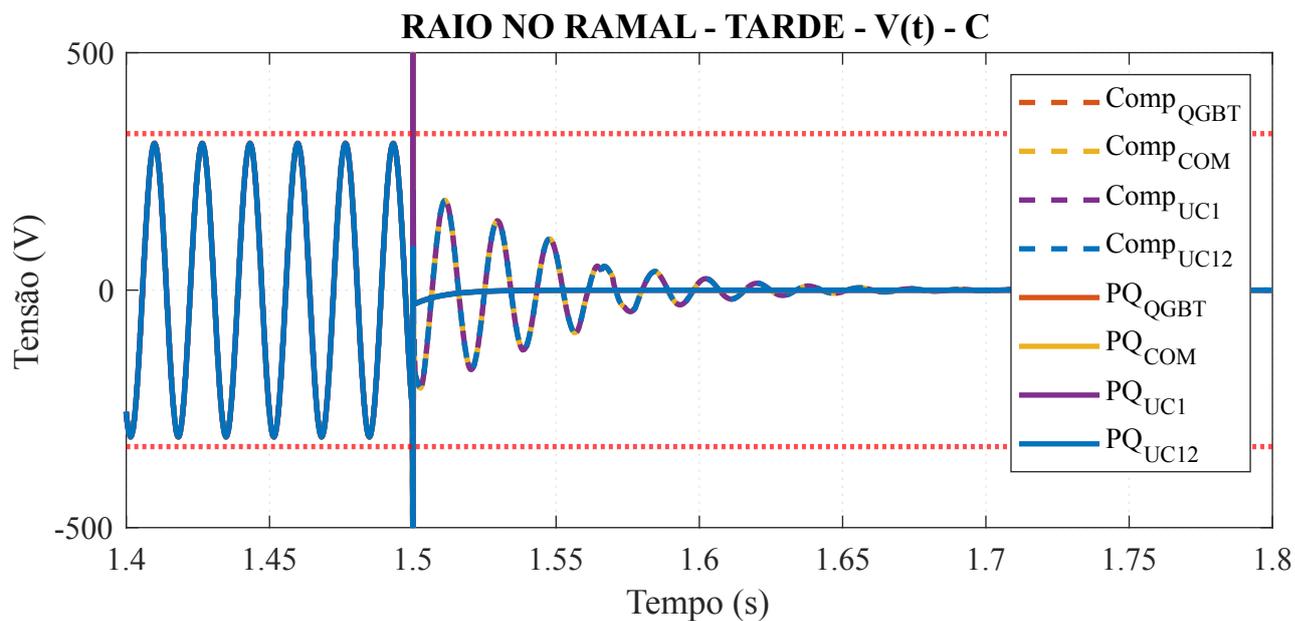
As Figuras 5.25 e 5.26 representam as tensões nas fases A, a qual recebe a descarga atmosférica, e a fase C, respectivamente. Como há um pulso de tensão na ordem de 10 kV, a proteção projetada na Figura 5.24 atua rapidamente, a Figura 5.27 mostra o intervalo de atuação da proteção implementada.

A linha constante em vermelho da Figura 5.25 representa o valor de pico para uma tensão considerada como crítica pela agência reguladora ANEEL ( $V_{critico} > 233V_{rms}$ ) (ANEEL, 2017a).



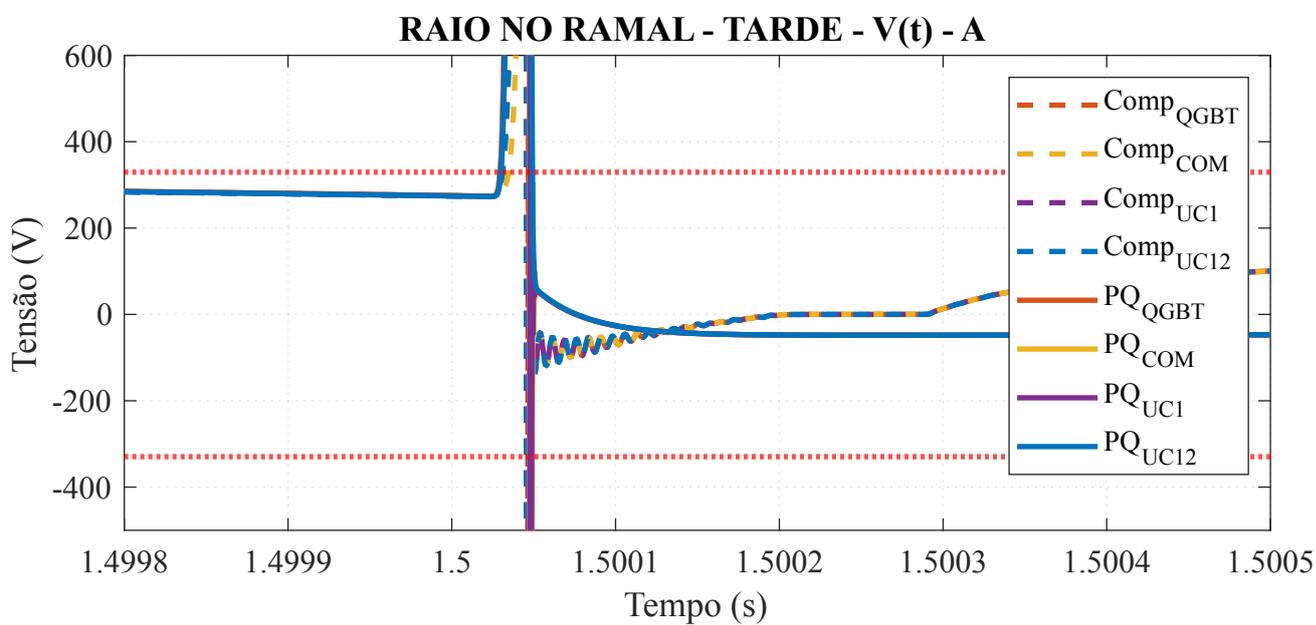
**Fonte:** autoria própria.

**Figura 5.26.** Tensão de alimentação da fase C nas unidades consumidoras.



Fonte: autoria própria.

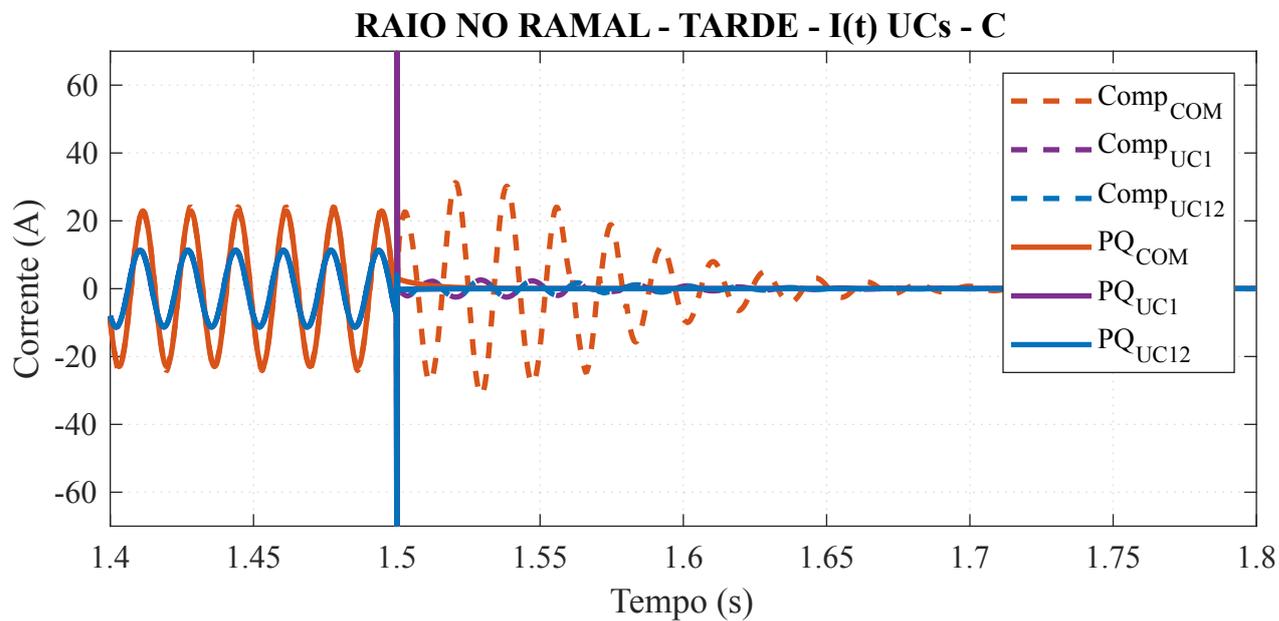
**Figura 5.27.** Tensão na fase A no instante de atuação da proteção.



Fonte: autoria própria.

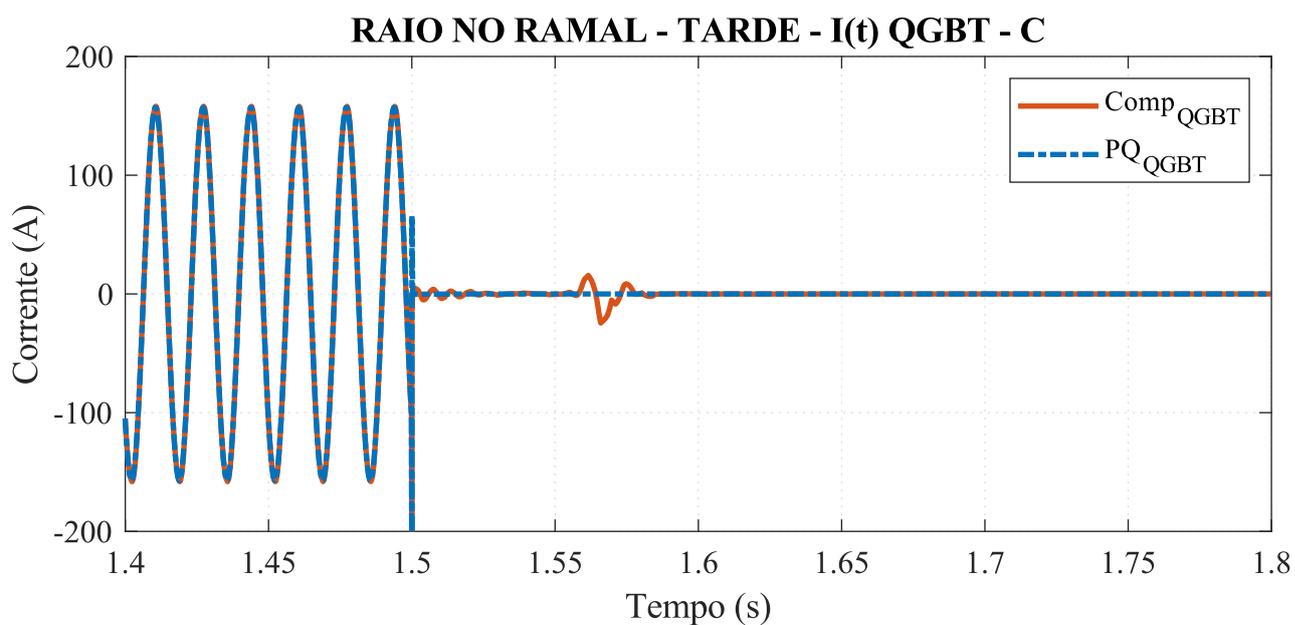
As Figuras 5.28 e 5.29 representam as correntes na fase C das unidades consumidoras e do QGBT, respectivamente.

Figura 5.28. Corrente de alimentação da fase C.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.29. Tensão na fase A no instante da atuação da proteção.



Fonte: autoria própria.

Calcularam-se os aumentos transitórios percentuais relacionando corrente e tensão máximas com seus respectivos valores nominais em regime permanente para cada cenário simulado, e constataram-se que a descarga atmosférica no cenário Tarde produz maiores sobretensões e sobrecorrentes percentuais. Dentre os dois cenários Tarde simulados, o que produz maiores sobrecorrentes é o cenário em que a descarga atmosférica está localizada no ramal.

Compararam-se os valores percentuais de sobrecorrentes e sobretensões calculados para os modelos PQ e a componente, constataram-se que a unidade consumidora “UC\_COM”, modelada a componente, é a única que apresenta maior sensibilidade a sobrecorrentes quando comparada ao modelo PQ. Em contrapartida, o modelo PQ possui maior sensibilidade a sobretensões produzidas por descarga atmosférica em todos os pontos monitorados.

A tabela 5.8 apresenta os maiores valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão para o cenário Tarde com descarga atmosférica localizada no ramal de distribuição.

**Tabela 5.8.** Valores percentuais de sobrecorrente e sobretensão com descargas atmosféricas no ramal, durante o cenário Tarde.

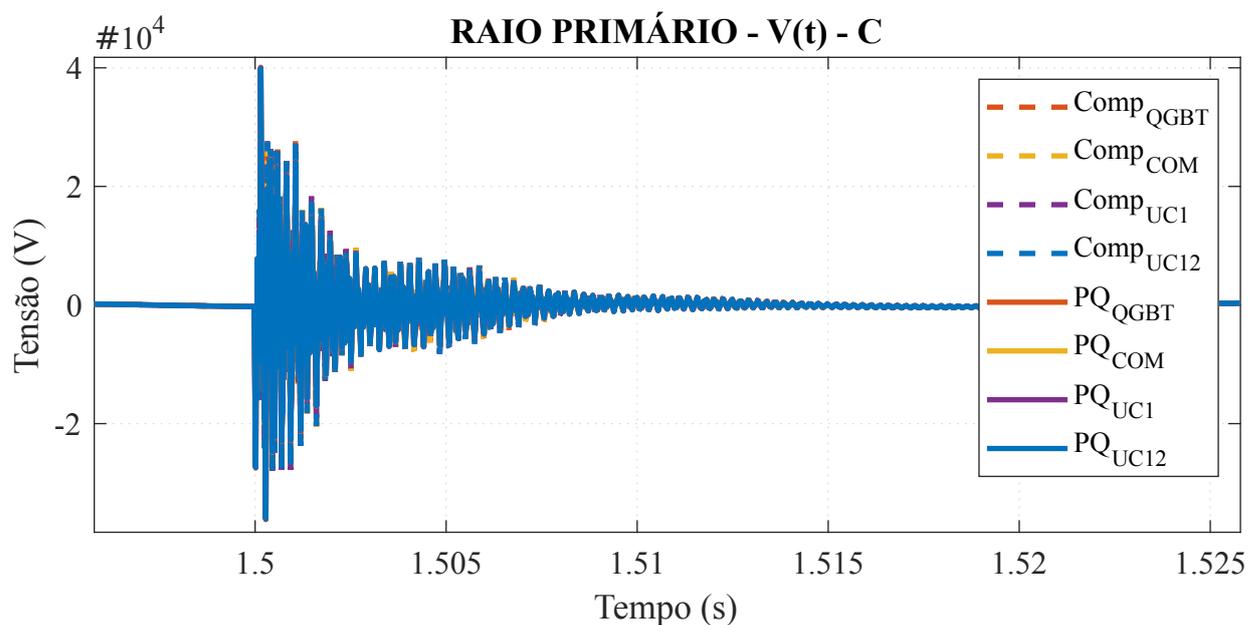
UC_COM - $I_c$		QGBT - $V_c$	
corrente PQ [%]	corrente Comp [%]	tensão PQ [%]	tensão Comp [%]
4865,64	33924,82	7674,60	6349,44

**Fonte:** autoria própria.

Simularam-se uma descarga atmosférica no primário do transformador, sem a proteção do bloco “Protege\_raio”, de forma a identificar se a instalação corre o risco de entrar na região “sujeito a danos aos equipamentos” por elevação de tensão da curva ITIC, Figura 2.3.

A Figura 5.30 caracteriza um perfil de sobretensão capaz de causar danos a equipamentos devido à elevação de tensão (curva ITIC).

**Figura 5.30.** Tensão na fase C caso a instalação não possua o elemento de proteção contra descargas atmosféricas.



**Fonte:** autoria própria.

#### 5.4.5 Resumo de resultados

A Tabela 5.9 agrega todos os distúrbios e análises dos seus respectivos resultados. “Critério Sobretensão” indica se houve uma sobretensão acima dos limites definidos em (ANEEL, 2017a). “Critério ITIC” indica a região em que a instalação se encontra na curva ITIC. As colunas “PQ vs Modelo” indicam se o modelo PQ subestima ou superestima as sobretensões e sobrecorrentes medidas no modelo a componente.

As regiões da curva ITIC na coluna “Critério ITIC” estão representadas por siglas, de forma que “SMF” é a região sujeita a mau funcionamento de equipamentos, “RT” é a região de tolerância e “SDF” é a região de danos físicos a equipamentos.

Observa-se na Tabela 5.9 que a ocorrência de uma descarga atmosférica, sem proteção contra sobretensões, é o único caso que caracteriza o nexo de causalidade entre distúrbio e dano a equipamentos eletrônicos, baseando-se na curva ITIC.

**Tabela 5.9.** Tabela resumo de resultados

Localização	Origem	Evento	Critério Sobretensão	Critério ITIC	Sobretensão PQ vs Modelo	Sobrecorrente PQ vs Modelo
<b>QGBT</b>	Interna	Curto-circuito	Atendido	SMF	Subestima	Subestima
<b>UC1</b>	Interna	Curto-circuito	Atendido	SMF	Subestima	Subestima
<b>UC12</b>	Interna	Curto-circuito	Atendido	SMF	Subestima	Subestima
<b>UC_COM</b>	Interna	Curto-circuito	Atendido	SMF	Subestima	Subestima
<b>PRIM. Transf</b>	Externa	Curto-circuito	Atendido	SMF	Subestima	Subestima
<b>SEC. Transf</b>	Interna	Religamento	Não Atendido	SMF	Subestima	Subestima
<b>PRIM. Transf</b>	Externa	Religamento	Não Atendido	SMF	Subestima	Subestima
<b>QGBT</b>	Interna	Chaveamento capacitivo	Não Atendido	RT	Subestima	Subestima
<b>Ramal</b>	Externa	Descarga atmosférica	Não Atendido	RT	Superestima	Superestima
<b>PRIM. Transf</b>	Externa	Descarga atmosférica	Não Atendido	RT	Superestima	Superestima
<b>PRIM. Transf (sem proteção)</b>	Externa	Descarga atmosférica	Não Atendido	SDE	Superestima	Superestima

**Fonte:** autoria própria.

# CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho alcançou o objetivo de comparar, no domínio do tempo, em diferentes cenários de carregamento ao longo do dia, as respostas transitórias de um modelo realista de carga com o modelo de carga linear de impedância constante, amplamente utilizado na modelagem de sistemas elétricos. De forma a analisar, nas condições de distúrbios, suas diferenças e seus impactos ao consumidor residencial. Para isto, demonstrou-se todas as implementações e resultados obtidos nas análises de distúrbios eletromagnéticos comuns a uma rede de distribuição de média tensão. A utilização dos *softwares*: EMTP, DCE-Prysmian e Matlab foram essenciais para um dimensionamento mais realista da instalação e para o monitoramento no domínio do tempo de todas as grandezas elétricas presentes no condomínio em estudo.

A partir dos resultados analisados, concluiu-se que o modelo de cargas lineares e o modelo de carga realista desenvolvido convergem quando em regime permanente, porém algumas respostas transitórias podem ter diferenças significativas de sobretensão ou sobrecorrente.

Por um lado, o modelo de carga realista, quando submetido a curto-circuito, retratou sobrecorrentes induzidas em todos os pontos monitorados do sistema. Já o modelo de cargas lineares, quando em curto-circuito, retratou apenas as sobrecorrentes medidas na unidade consumidora em curto e em seu caminho elétrico comum (QGBT), sem apresentar sobrecorrentes em outros pontos da instalação. Dentre os cenários simulados, o cenário Tarde apresentou as maiores elevações percentuais de corrente, pois há um maior percentual de cargas motoras em relação à potência instantânea demandada.

Por outro lado, o modelo de carga realista, quando submetido a surtos de religamento, apresentou sobrecorrentes expressivas, podendo chegar a 8 vezes o valor nominal de regime permanente, sendo o pior caso no religamento do primário do transformador no cenário Tarde, isso pode ser explicado pois há partida de motores monofásico e trifásicos no religamento. Entretanto, o modelo de cargas lineares, quando submetido a surtos de religamento, apresentou a

maior sobrecorrente, 113,21% da corrente nominal, no cenário Noite, pois é o cenário com maior potência instantânea demandada. Além da sobrecorrente analisada, o modelo de cargas realista apresentou uma sobretensão máxima de 113,84% da tensão nominal em regime permanente, superando os limites críticos estabelecidos pela ANEEL durante um curto período. Essa sobretensão analisada é devida aos elementos armazenadores de energia presentes na modelagem dos componentes. Já o modelo de cargas lineares não apresentou sobretensões significativas nos surtos de religamento. Outro ponto interessante é o perfil de decaimento da tensão ao seccionar a alimentação, o modelo de cargas realista teve sua tensão decaída como um sinal subamortecido com envoltória exponencial, já o modelo de cargas lineares teve sua tensão decaída conforme a curva típica de decaimento para um indutor. Identificou-se, apenas para a modelagem realista, que no momento em a tensão decai como um sinal subamortecido, o condomínio se encontra na região sujeita a mau funciona funcionamento ou desligamentos por afundamento de tensão da curva ITIC para equipamentos eletrônicos.

Os dois modelos, quando submetidos ao chaveamento capacitivo, apresentaram sobrecorrentes e sobretensões, porém os valores percentuais de sobretensão e de sobrecorrente foram maiores no modelo de cargas realistas. Os dois modelos apresentaram sobretensões que ultrapassam os limites considerados como críticos pela agência reguladora ANEEL por um período de meia de onda. Um exemplo da diferença entre os modelos é a sobrecorrente percentual na fase A do quadro de área comum “UC\_COM”, 222,84% para o modelo realista e 149,56% para o modelo de cargas lineares.

Por fim, para os casos de descarga atmosférica, o modelo de carga realista possui maior sobrecorrente percentual nas unidades consumidoras com motores trifásicos ativos, como em “UC\_COM”. Porém, caso a unidade consumidora possua apenas motores monofásicos “UC1-UC12”, o modelo de cargas lineares tiveram maiores valores de sobrecorrente e sobretensão percentual. Identificou-se que caso não exista um bloco de proteção contra descargas atmosféricas, o condomínio se encontra na região sujeita a danos aos equipamentos eletrônicos por elevação de tensão da curva ITIC, caracterizando o único caso denexo de causalidade entre distúrbios e danos a equipamentos eletrônicos.

De acordo com o estudo realizado nesta tese, é possível sugerir linhas de estudo relacionadas com o tema:

- Modelagem de cargas industriais e comerciais realistas conectadas à rede de distribuição;
- Estudo de transitórios eletromagnéticos com modelagem realista de elementos de proteção;
- Estudo de harmônicas inseridas no sistema sistema de distribuição, relacionando qualidade de energia e a presença de harmônicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. *NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão*. 2004. Citado na página 4.
- ALMEIDA, W. G. de; FREITAS, F. D. *Circuitos Polifásicos: teoria e ensaios*. [S.l.]: FINATEC, 1995. Citado na página 7.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica*. 2017. Citado 7 vezes nas páginas 1, 12, 46, 50, 56, 59, and 63.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 9: Ressarcimento de Danos Elétricos*. 2017. Citado na página 1.
- BREDA, J. F. D. *et al. Um modelo computacional para o relé digital de sobrecorrente empregado na proteção de sistemas elétricos de potência*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2009. Citado na página 2.
- BRITTO, A. G. M. Realistic modeling of power lines for transient electromagnetic interference studies. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 2.
- CRESSWELL, C. *Steady state load models for power system analysis*. Tese (Doutorado) — University of Edinburgh, 2009. Citado 6 vezes nas páginas 13, 14, 16, 17, 18, and 20.
- HONRUBIA-ESCRIBANO, A.; GÓMEZ-LÁZARO, E.; MOLINA-GARCÍA, A.; FUENTES, J. Influence of voltage dips on industrial equipment: Analysis and assessment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 41, n. 1, p. 87–95, 2012. Citado na página 11.
- JÚNIOR, L. C. Z. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52*. [S.l.]: EdUSP, 2003. Citado na página 1.
- LUO, G.; YAO, C.; LIU, Y.; TAN, Y.; HE, J. Entropy svm-based recognition of transient surges in hvdc transmissions. *Entropy*, MDPI, v. 20, n. 6, p. 421, 2018. Citado na página 10.
- MARTINHO, E. *Distúrbios da energia elétrica*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2009. Citado na página 8.
- MILANI, M. T.; KHODABAKHCHIAN, B.; MAHSEREDJIAN, J. Detailed emt-type load modeling for power system dynamic and harmonic studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 38, n. 1, p. 703–711, 2022. Citado 12 vezes nas páginas 3, 14, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, and 28.
- NEOENERGIA. *NOR.DISTRIBU-ENGE-0022 - Fornecimento de Energia Elétrica à Edificações com Múltiplas Unidades Consumidoras*. 2017. Citado na página 43.
- RIBEIRO, J.; LANGE, F. A new aggregation method for determining composite load characteristics. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 8, p. 2869–2875, 1982. Citado na página 7.

SATO, F.; FREITAS, W. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. *Rio de Janeiro: Elsevier*, 2015. Citado na página 9.

TOLEDO, R. T. Análise da estratégia de abertura monopolar na proteção de redes de distribuição. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 3, 4, 38, and 40.

WEG. *Transformador Óleo 300.0kVA 13.8/0.38 kV CST ONAN*. 2023. <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/>>. [Online; accessed 19-July-2023]. Citado na página 41.

ZHU, Y. *Power system loads and power system stability*. [S.l.]: Springer Nature, 2020. Citado na página 6.

## ANEXO A - CENÁRIO MANHÃ

Tabela 1. Equipamentos em operação nos apartamentos (“UC1-UC12”).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_COOKING	Forno elétrico	3	1	3
	Torradeira	1	1	1
RES_SP_HEAT	Secador de cabelo	1	1	1
RES_WT_HEAT	Chuveiro	5,5	1	5,5
MOTOR_MONO	Máquina de Lavar	0,55	1	0,55
	Geladeira	0,38	1	0,38
	Ar-condicionado 10000 BTU	1,2	3	3,6
	Exaustor	0,15	1	0,15

Fonte: autoria própria.

Tabela 2. Relação entre potência demandada e potência instalada nos apartamentos (“UC1-UC12”).

Modelo	Pot. instalada[kW]	Pot. total [kW]	%
RES_COOKING	3,8	3,8	100,00
RES_SP_HEAT	2	1	50,00
RES_WT_HEAT	11	5,5	50,00
MOTOR_MONO	5,28	4,68	88,64

Fonte: autoria própria.

**Tabela 3.** Equipamentos em operação na área comum (“UC\_COM”).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_WT_HEAT	Chuveiro	5,5	1	5,5
SMPS_PC	Computador	0,3	2	0,6
SMPS_TV	Televisão	0,28	1	0,28
ILUM_CFL	Lâmpadas fluorescentes	0,36	1	0,36
MOTOR_MONO	Geladeira e freezer	0,58	1	0,58
	Motor do portão	0,93	1	0,93

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 4.** Motores trifásicos na área comum (UC\_COM).

Modelo	Equipamento	Pot. [kVA]	Qtd. [un]	Pot. total [kVA]
ELEVATOR_3PH	Elevador	10,19	1	10,19
PUMP_3PH	Bomba	4,7	1	4,7

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 5.** Relação entre potência demandada e potência instalada na área comum (“UC\_COM”).

Modelo	Pot. instalada [kW]	Pot. demandada [kW]	%
RES_WT_HEAT	5,5	5,5	100,00
SMPS_PC	0,6	0,6	100,00
SMPS_TV	0,28	0,28	100,00
ILUM_CFL	1,2	0,36	30,00
MOTOR_MONO	3,91	1,51	38,60

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 6.** Demanda de motores trifásicos de (UC\_COM) em operação.

Modelo	Pot. instalada [kVA]	Pot. demandada [kVA]	%
ELEVATOR_3PH	10,19	10,19	100,00
PUMP_3PH	4,7	4,7	100,00

**Fonte:** autoria própria.

## ANEXO B - CENÁRIO TARDE

**Tabela 7.** Equipamentos em operação nos apartamentos (“UC1-UC12”).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_COOKING	Forno elétrico	3	1	3
RES_SP_HEAT	Ferro elétrico	1	1	1
SMPS_TV	Televisão	0,28	2	0,56
MOTOR_MONO	Geladeira	0,38	1	0,38
	Aspirador de pó	0,6	1	0,6
	Exaustor	0,15	1	0,15

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 8.** Relação entre potência demandada e potência instalada nos apartamentos (“UC1-UC12”).

Modelo	Pot. instalada [kW]	Pot. demandada [kW]	%
RES_COOKING	3,8	3	78,90
RES_SP_HEAT	2	1	50,00
SMPS_TV	0,56	0,56	100,00
MOTOR_MONO	5,28	1,13	21,40

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 9.** Equipamentos em operação na área comum (“UC\_COM”).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
SMPS_PC	Computador	0,3	2	0,6
SMPS_TV	Televisão	0,28	1	0,28
ILUM_CFL	Lâmpadas fluorescentes	0,36	1	0,36
MOTOR_MONO	Geladeira e freezer	0,58	1	0,58
	Ar-condicionado 18000 BTU	2,4	1	2,4
	Motor do portão	0,93	1	0,93

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 10.** Motores trifásicos na área comum (“UC\_COM”).

Modelos	Equipamento	Potência instantânea. [kVA]
<b>ELEVATOR_3PH</b>	Elevador	5,095

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 11.** Relação entre potência demandada e potência instalada na área comum (“UC\_COM”).

Modelo	Pot. instalada [kW]	Pot. demandada [kW]	%
<b>SMPS_PC</b>	0,6	0,6	100,00
<b>SMPS_TV</b>	0,28	0,28	100,00
<b>ILUM_CFL</b>	1,2	0,36	30,00
<b>MOTOR_MONO</b>	3,91	3,91	100,00

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 12.** Demanda de motores trifásicos de (UC\_COM) em operação.

Modelo	Pot. instalada [kVA]	Pot. demandada[kVA]	%
<b>ELEVATOR_3PH</b>	10,19	5,095	50,00

**Fonte:** autoria própria.

## ANEXO C - CENÁRIO NOITE

**Tabela 13.** Equipamentos em operação nos apartamentos (“UC1-UC12”).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_COOKING	Forno elétrico	3	1	3
RES_SP_HEAT	Secador de cabelo	1	1	1
RES_WT_HEAT	Chuveiro	5,5	2	11
SMPS_PC	Computador	0,3	2	0,6
SMPS_TV	Televisão	0,28	2	0,56
ILUM_LED	Lâmpadas LED	0,5	1	0,5
MOTOR_MONO	Geladeira	0,38	1	0,38
	Ar-condicionado 10000 BTU	1,2	3	3,6
	Exaustor	0,15	1	0,15

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 14.** Relação entre potência demandada e potência instalada nos apartamentos (“UC1-UC12”).

Modelo	Pot. instalada [kW]	Pot. demandada [kW]	%
RES_COOKING	3,8	3	78,90
RES_SP_HEAT	2	1	50,00
RES_WT_HEAT	11	11	100,00
SMPS_PC	0,6	0,6	100,00
SMPS_TV	0,56	0,56	100,00
ILUM_LED	0,5	0,5	100,00
MOTOR_MONO	5,28	4,13	78,20

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 15.** Equipamentos em operação na área comum (“UC\_COM”).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_WT_HEAT	Chuveiro	5,5	1	5,5
SMPS_PC	Computador	0,3	2	0,6
SMPS_TV	Televisão	0,28	1	0,28
ILUM_CFL	Lâmpadas fluorescentes	1,2	1	1,2
MOTOR_MONO	Geladeira e freezer	0,58	1	0,58
	Motor do portão	0,93	1	0,93

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 16.** Motores trifásicos de (“UC\_COM”) em operação.

Modelo	Equipamento	Pot. [kVA]	Qtd. [un]	Pot. total [kVA]
ELEVATOR_3PH	Elevador	10,19	1	10,19
PUMP_3PH	Bomba	4,7	1	4,7

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 17.** Relação entre potência demandada e potência instalada na área comum (“UC\_COM”).

Modelo	Pot. instalada [kW]	Pot. demandada[kW]	%
RES_WT_HEAT	5,5	5,5	100,00
SMPS_PC	0,6	0,6	100,00
SMPS_TV	0,28	0,28	100,00
ILUM_CFL	1,2	1,2	100,00
MOTOR_MONO	3,91	1,51	38,60

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 18.** Demanda de motores trifásicos de (“UC\_COM”) em operação.

Modelo	Pot. instalada [kVA]	Pot. demandada[kVA]	%
ELEVATOR_3PH	10,19	10,19	100,00
PUMP_3PH	4,7	4,7	100,00

**Fonte:** autoria própria.

## ANEXO D - CENÁRIO INDUTIVO

**Tabela 19.** Equipamentos em operação nos apartamentos (“UC1-UC12”).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_SP_HEAT	Secador de cabelo	1	1	1
SMPS_PC	Computador	0,3	2	0,6
SMPS_TV	Televisão	0,28	2	0,56
MOTOR_MONO	Máquina de Lavar	0,55	1	0,55
	Geladeira	0,38	1	0,38
	Ar-condicionado 10000 BTU	1,2	3	3,6
	Aspirador de pó	0,6	1	0,6
	Exaustor	0,15	1	0,15

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 20.** Relação entre potência demandada e potência instalada nos apartamentos (“UC1-UC12”).

Modelo	Pot. instalada [kW]	Pot. demandada [kW]	%
RES_SP_HEAT	2	1	50,00
SMPS_PC	0,6	0,6	100,00
SMPS_TV	0,56	0,56	100,00
MOTOR_MONO	5,28	5,28	100,00

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 21.** Equipamentos em operação na área comum (“UC\_COM”).

Modelo	Equipamento	Pot. [kW]	Qtd. [un]	Pot. total [kW]
RES_WT_HEAT	Chuveiro	5,5	1	5,5
SMPS_PC	Computador	0,3	2	0,6
SMPS_TV	Televisão	0,28	1	0,28
ILUM_CFL	Lâmpadas fluorescente	0,36	1	0,36
MOTOR_MONO	Geladeira	0,58	1	0,58
	Ar-condicionado 18000 BTU	2,4	1	2,4
	Motor Portão	0,93	1	0,93

Fonte: autoria própria.

**Tabela 22.** Motores trifásicos de (“UC\_COM”) em operação.

Modelo	Equipamento	Pot. [kVA]	Qtd. [un]	Pot. total [kVA]
ELEVATOR_3PH	Elevador	10,19	1	10,19
PUMP_3PH	Bomba	4,7	1	4,7

Fonte: autoria própria.

**Tabela 23.** Relação entre potência demandada e potência instalada na área comum (“UC\_COM”).

Modelo	Pot. instalada [kW]	Pot. demandada [kW]	%
RES_WT_HEAT	5,5	5,5	100,00
SMPS_PC	0,6	0,6	100,00
SMPS_TV	0,28	0,28	100,00
ILUM_CFL	1,2	0,36	30,00
MOTOR_MONO	3,91	3,91	100,00

Fonte: autoria própria.

**Tabela 24.** Demanda de motores trifásicos de (“UC\_COM”) em operação.

Modelo	Pot. instalada [kVA]	Pot. demandada [kVA]	%
ELEVATOR_3PH	10,19	10,19	100,00
PUMP_3PH	4,7	4,7	100,00

Fonte: autoria própria.