

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA**

DANIELLY REGINA DE PAULA

**ESTUDO E CONTRIBUIÇÕES PARA A SEGURANÇA
CONTRA ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA EM MORADIAS**

DOURADOS, 2022

DANIELLY REGINA DE PAULA

**ESTUDO E CONTRIBUIÇÕES PARA A SEGURANÇA
CONTRA ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA EM MORADIAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, área de concentração 3.04.04.06-1 Instalações Elétricas Prediais e Industriais, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Aureo Cezar de Lima

DOURADOS, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

P324e Paula, Danielly Regina De
Estudo e contribuições para a segurança contra acidentes de origem elétrica em moradias
[recurso eletrônico] / Danielly Regina De Paula. -- 2022.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Aureo Cezar de Lima.
TCC (Graduação em Engenharia de Energia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2022.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Choque elétrico. 2. proteção em instalações elétricas. 3. NBR 5410. 4. modelagem. I. Lima,
Aureo Cezar De. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

DANIELLY REGINA DE PAULA

**ESTUDO E CONTRIBUIÇÕES PARA A SEGURANÇA
CONTRA ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA EM MORADIAS**

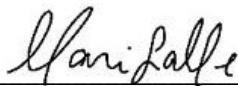
Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, área de concentração 3.04.04.06-1 Instalações Elétricas Prediais e Industriais, pela comissão formada por:



Orientador: Prof. Dr. Aureo Cezar Lima
FAEN – UFGD



Prof. Dr. Étienne Biasotto
FAEN – UFGD



Prof. Dr. Mariana Lara Menegazzo
FAEN – UFGD

DOURADOS - MS
15 DE DEZEMBRO 2022

*“Dedico esse trabalho à minha mãe e em memória de minha avó,
essa conquista também é de vocês”*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me abençoado até aqui, sempre iluminando meus caminhos, por não ter me deixado desistir e ter tornado possível essa conquista, mesmo diante dos obstáculos. Agradeço à Nossa Senhora Aparecida por ser minha intercessora, sempre me abençoando e protegendo.

Agradeço à minha mãe Nilva, por ser minha base, meu maior exemplo de força e dedicação, por todo seu esforço para que essa conquista fosse possível, por todas as palavras de apoio, pelos conselhos, afago nos momentos difíceis, por todo o incentivo ao longo desses anos, por ter acreditado e vivido essa etapa comigo.

Agradeço ao meu padrinho Lenir, por ser a representação da figura paterna, por ter sido minha inspiração para escolha de profissão, pelo apoio e toda ajuda ao longo desse período.

Agradeço ao meu namorado Bruno, por estar comigo durante essa etapa, pelas palavras de incentivo, por todo apoio, por acreditar na minha capacidade, mesmo quando eu estava desmotivada.

Agradeço à minha prima Isabela e minha amiga Maria Cristina, pela amizade, parceria, por serem minhas ouvintes, pelos conselhos, palavras de incentivo e apoio.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo da graduação, por terem tornado essa jornada mais leve, pelos estudos em grupo, pelas duplas de prova, pelas risadas e palavras de incentivo nos momentos difíceis, em especial à Bruna, Maria Cristina e Tainá, a parceria com vocês foi incrível e memorável.

Agradeço aos demais familiares e amigos que acompanharam essa trajetória e contribuíram diretamente, ou indiretamente, comigo.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Aureo Cezar de Lima por toda sua paciência, incentivo, ajuda, durante toda a graduação, em especial ao longo desse trabalho, por toda dedicação, auxílio e por compartilhar seus conhecimentos para chegarmos nessa etapa final.

Agradeço aos demais professores da Universidade Federal da Grande Dourados por todos os ensinamentos, e por terem feito parte dessa etapa, em especial os professores do curso de Engenharia de Energia.

“Seja forte e corajoso! Não se apavore
nem desanime, pois o Senhor,
o seu Deus, estará com você por onde você andar”

Josué 1:9

RESUMO

É notória a importância da energia elétrica nas moradias, caracterizada, sobretudo, pelo conforto e praticidade pelo uso dos equipamentos eletroeletrônico. O consumo de eletricidade no Brasil no setor residencial representou 26,4 % em 2021, devendo ser considerado, ainda, um crescimento anual de 2% dos domicílios e 1% na população. Contrapondo-se aos benefícios da eletricidade, observou-se nas moradias, em 2021, 674 vítimas fatais por choque elétrico, 47 por incêndio e 40 por descarga atmosférica, contabilizando, ainda, um crescimento anual de 6,6 %. Propôs-se, então, neste trabalho, modelar o circuito da corrente fase-massa, bem como, determinar a corrente de choque, a tensão de contato, o tempo de atuação da proteção e os efeitos resultantes do contato direto e indireto em partes energizadas a partir de nove condições modeladas e três Estudos de Casos. Observou-se que instalações sem aterramento e quadro de distribuição apresentam corrente e tempo de choque suficiente para levar óbito; que o quadro de distribuição com disjuntores adequadamente dimensionados e elevadas correntes de curto-circuito podem desarmar o dispositivo protegendo contra contatos indiretos, sobretudo, não atuam para contatos diretos. Por fim, constatou-se que o atendimento da norma ABNT NBR 5410: 2008 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão, com o projeto e instalação adequada do aterramento, quadro de distribuição, disjuntores e dispositivo diferencial residual é necessário e suficiente para a proteção contra contato direto e indireto e, desta forma, preservar a integridade física e psicológica em uma habitação domiciliar.

Palavras-chave: Choque elétrico; proteção em instalações elétricas; NBR 5410; modelagem.

ABSTRACT

The importance of electricity in homes is notorious, characterized by comfort and practicality using electric appliance and electronic equipment. Electricity consumption in Brazil in the residential sector represented 26.4% in 2021 and should also be considered an annual growth of 2% of households and 1% in the population. In contrast to the benefits of electricity, 674 fatal victims due to electric shock, 47 by fire and 40 by atmospheric discharge were observed in homes in 2021, accounting for an annual growth of 6.6%. It was then proposed, in this work, to model the phase-mass current circuit, as well as to determine the shock current, contact voltage, time of operation of the protection and the effects resulting from direct and indirect contact in energized parts from nine modeled conditions and three Case Studies. It was observed that installations without grounding and distribution picture present current and sufficient shock time to lead to death; that the distribution frame with properly sized circuit breakers and high short-circuit currents can disarm the device protecting against indirect contacts, especially do not act for direct contacts. Finally, it was found that compliance with the ABNT NBR 5410: 2008 - Low Voltage Electrical Installations, with the proper design and installation of the grounding, distribution board, circuit breakers and residual differential device is necessary and sufficient for protection against direct and indirect contact and, thus, preserve the physical and psychological integrity in a home room.

Keywords: Electric shock; protection in electrical installations; NBR 5410; modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre indicadores sociais e o consumo per capita de energia.....	20
Figura 2 – Evolução dos indicadores de energia oferta interna per capita e oferta interna por PIB entre 1970 e 2021	21
Figura 3 – Evolução dos indicadores de energia elétrica oferta interna per capita e oferta interna por PIB entre 1970 e 2021	22
Figura 4 – Participação setorial no consumo de eletricidade em 2021	22
Figura 5 – Evolução na população e número de moradias do Brasil	23
Figura 6 – Acidentes de origem elétrica no Brasil no ano 2021	24
Figura 7 – Acidentes de origem elétrica no Brasil no período entre 2013 e 2021	24
Figura 8 – Quantidade de choques elétrico total e fatal em residência por causa no ano 2021 no Brasil	25
Figura 9 – Número de acidentes por choque elétrico em moradias no Brasil em 2021 por tipo de aparelho	26
Figura 10 – Variação do número de acidentes por choque elétrico em moradias no Brasil entre 2020 e 2021 por tipo de aparelhos.....	26
Figura 11 – Tipo de construção do imóvel pesquisado.....	27
Figura 12 – Instalação de dispositivos de proteção DR e DPS nos imóveis no Brasil em 2016	28
Figura 13 – Existência de condutor de aterramento nas moradias do Brasil em 2016	28
Figura 14 – Condições dos quadros de distribuição no Brasil em 2016.....	29
Figura 15 – Choques elétricos nas residências brasileiras	29
Figura 16 – Choque elétrico por contato direto e indireto	32
Figura 17 – Caminhos da corrente elétrica no corpo humano	32
Figura 18 – Representação das resistências equivalentes do corpo humano e correntes de choque elétrico	34
Figura 19 – Zonas de efeito de corrente alternada em 50 ou 60 Hz sobre adultos	35
Figura 20 – Disposição dos números e letras do código de proteção IP.....	37
Figura 21 – Disposição dos números e letras do código de proteção IP.....	37
Figura 22 – Teste e equipamento para verificação dos graus de proteção contra contato IP_	38
Figura 23 – Barramento de equipotencialização principal (BEP).....	39

Figura 24 – Representação da proteção supletiva por seccionamento automático	40
Figura 25 – Esquema de ligação de aterramento tipo TN-C-S	40
Figura 26 – Circuito equivalente para determinação da tensão de contato presumida	41
Figura 27 – Diagrama para análise do tempo de atuação e tensão de falta U_B	44
Figura 28 – Curva característica típica de atuação de um disjuntor conforme a norma ABNT NBR 60898:2004.....	45
Figura 29 – Caracterização de uma instalação com barramento de equipotencialização principal e local	47
Figura 30 – Representação da corrente vetorial diferencial residencial	48
Figura 31 – Vista em corte de um interruptor diferencial residual tetrapolar	48
Figura 32 – Atuação de um dispositivo DR de 30 mA na proteção contra contatos diretos	50
Figura 33 – Caracterização do sistema: transformador ao circuito terminal	51
Figura 34 – Circuito equivalente inicial do sistema analisado.....	52
Figura 35 – Circuito equivalente com resistência de falha e de choque	54
Figura 36 – Máquina de lavar roupa com falha para massa: tensão na carcaça.....	55
Figura 37 – Circuito da corrente de falha de uma máquina de lavar roupa	55
Figura 38 – Circuito equivalente do Caso 01: tensão 220 V sem aterramento, quadro e DR... 57	57
Figura 39 – Tensão da fonte, de contato e corrente de choque para o Caso 01	58
Figura 40 – Gráfico da curva de desarme dos disjuntores.	59
Figura 41 – Circuito equivalente do Caso 02: tensão 127 V sem aterramento, quadro e DR... 60	60
Figura 42 – Tensão da fonte, de contato e corrente de choque para o Caso 02	60
Figura 43 – Circuito equivalente do Caso 03: tensão 220 V sem quadro e DR e com aterramento	61
Figura 44 – Tensão da fonte, de contato e corrente de curto e de choque para o Caso 03	61
Figura 45 – Circuito equivalente do Caso 04: tensão 127 V sem quadro e DR e com aterramento	62
Figura 46 – Tensão da fonte, de contato e corrente de curto e de choque para o Caso 04	62
Figura 47 – Circuito equivalente do Caso 08: tensão 127 V sem DR e com quadro, aterramento e resistência de falta.....	64
Figura 48 – Tensão da fonte, de contato e corrente de curto e de choque para o Caso 08	65
Figura 49 – Quadro de distribuição com a instalação de DR de acordo com o Caso 9	66
Figura 50 – Detalhe da montagem de um Dispositivo DR	67
Figura 51 – Rede de alimentação mestre da residência do Estudo de Caso 01	71
Figura 52 – Transformador e padrão de entrada do Estudo de Caso 01	72

Figura 53 – Localização e distância da rede de distribuição para o Estudo de Caso 01	72
Figura 54 – Máquina de lavar roupa do Estudo de Caso 01	73
Figura 55 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 01: tensão 127 V sem DR, quadro e aterramento	73
Figura 56 – Tensão da fonte, de contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 01	74
Figura 57 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 01a: tensão 127 V sem DR e quadro e com aterramento	74
Figura 58 – Tensão da fonte, contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 01a	75
Figura 59 – Quadro de distribuição do Estudo de Caso 02.....	76
Figura 60 – Transformador e padrão de entrada do Estudo de Caso 02	76
Figura 61 – Localização e distância da rede de distribuição para o Estudo de Caso 02.....	77
Figura 62 – Máquina de lavar roupa do Estudo de Caso 02	77
Figura 63 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 02: tensão 127 V sem Dispositivo DR ..	78
Figura 64 – Tensão da fonte, de contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 02	78
Figura 65 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 02a: tensão 127 V sem Dispositivo DR com resistência de falta	79
Figura 66 – Tensão da fonte, de contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 02a	79
Figura 67 – Localização e distância da rede de distribuição para o Estudo de Caso 03.....	80
Figura 68 – Transformador e padrão de entrada do Estudo de Caso 03	80
Figura 69 – Localização do ponto de tomada do equipamento do Estudo de Caso 03.....	82
Figura 70 – Quadro de distribuição do Estudo de Caso 03.....	82
Figura 71 – Advertência fixada no quadro de distribuição do Estudo de Caso 03	83
Figura 72 – Máquina de lavar roupa do Estudo de Caso 03	83
Figura 73 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 03: tensão 127 V com Dispositivo DR..	84
Figura 74 – Tensão da fonte, de contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 03	84
Figura 75 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 03: tensão 220 V com Dispositivo DR e resistência de falta	85
Figura 76 – Tensão da fonte, de contato e corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 03a	85

Figura 77 – Corrente de desarme de um dispositivo DR em função da frequência.....	86
Figura 78 – Roteiro de acionamento ou manutenção de um dispositivo DR.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos métodos de proteção contra choques elétricos.....	36
Quadro 2 – Definição das situações 1, 2 e 3 das influências externas para a proteção contra choques elétricos.....	42
Quadro 3 – Características e configuração dos nove modelos simulados de alimentação de moradia	56
Quadro 4 – Resultados das simulações considerando nove casos de condição de corrente de falta em moradia	69
Quadro 5 – Quadro de cargas do Estudo de Caso 03	81
Quadro 6 – Resultados das simulações considerando nove casos de condição de corrente de falta em moradia	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores da tensão de contato limite U_L (V).....	42
Tabela 2 – Tempos de seccionamento máximo para esquema de ligação TN	43
Tabela 3 – Características de corrente residual nominal e tempo de disparo do Dispositivo DR de fabricação Siemens	66
Tabela 4 – Características de corrente máxima do Dispositivo DR de fabricação Siemens...	67
Tabela 5 – Impedância do percurso da corrente de falta fase-massa ($Z_{Smáx}$) quando a proteção contra contatos indiretos é realizada por disjuntores em caixa moldada conforme NBR NM 60898, considerando-se o tempo de seccionamento de 0,2 segundos.....	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampere
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACOPEL	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
BA	Classificação da ABNT NBR 5410:2008 por competência da pessoa
BB	Classificação da ABNT NBR 5410:2008 por resistência do corpo
BC	Classificação da ABNT NBR 5410:2008 por contato com o aterramento
BEL	Barramento de Equipotencialização Local
BEP	Barramento de Equipotencialização Principal
CA	Corrente Alternada
DPS	Dispositivo de proteção Contra Surtos
DP	Dispositivo de Proteção
DR	Dispositivo Diferencial Residual
EPI	Equipamento de Proteção Individual
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
Hz	Hertz
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
I	Corrente Elétrica
IP	Índice de Proteção
kVA	Quilovolt Ampere
kWh	Quilowatt-hora
L	Indutância
MPS	Medidas de Proteção contra Surtos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NDU	Norma de Distribuição Unificada
NR	Norma Regulamentadora
P	Potência ativa
OIE	Oferta Interna de Energia
PE	Condutor de Proteção
PELV	Extra Baixa Tensão Separada
PIB	Produto Interno Bruto

PROCOBRE	Instituto Brasileiro do Cobre
S	Potência Aparente
R	Resistência
SELV	Extra Baixa Tensão Separada
t	Tempo
TEP; TOE	Tonelada Equivalente de Petróleo
TN	Sistema de aterramento Terra Neutro
TWh	Terawatt-hora
U; V	Tensão elétrica
X	Reatância
Z	Impedância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	IDENTIFICAÇÃO DO CHOQUE ELÉTRICO EM MORADIAS	25
1.2	OBJETIVO GERAL	30
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
2	PROTEÇÃO CONTRA CHOQUES ELÉTRICOS EM RESIDÊNCIA	31
2.1	O CHOQUE ELÉTRICO	31
2.1.1	Proteção contra choques elétricos.....	35
2.1.1.1	Proteção básica contra choques elétricos.....	37
2.1.1.2	Proteção supletiva contra choques elétricos	38
2.1.1.3	Proteção adicional contra choques elétricos	46
3	DETERMINAÇÃO DA CORRENTE E TENSÃO DE CHOQUE ELÉTRICO	51
3.1	CÁLCULO DA CORRENTE, TEMPO E TENSÃO DE CHOQUE ELÉTRICO	55
3.1.1	Casos 01 e 02: Tensões 220 V e 127 V sem aterramento, quadro e DR.....	57
3.1.2	Casos 03 e 04: Tensões 220 V e 127 V sem quadro e DR e com aterramento ..	60
3.1.3	Casos 05, 06 e 07: Tensões 220 V e 127 V sem DR e com quadro e aterramento	63
3.1.4	Caso 08: Tensão 127 V sem DR e com quadro, aterramento e resistência de falta	64
3.1.5	Caso 09: Tensão 220 V com quadro, aterramento e DR	65
3.1.6	Resumo dos casos modelados.....	68
4	ESTUDO DE CASO DE CHOQUE ELÉTRICO EM MORADIA	71
4.1	ESTUDO DE CASO 01: AUSÊNCIA DE QUADRO, ATERRAMENTO E DR.....	71
4.2	ESTUDO DE CASO 02: AUSÊNCIA DE DISPOSITIVO DR.....	75
4.3	ESTUDO DE CASO 03 DE ACORDO COM A ABNT NBR 5410:2008	80

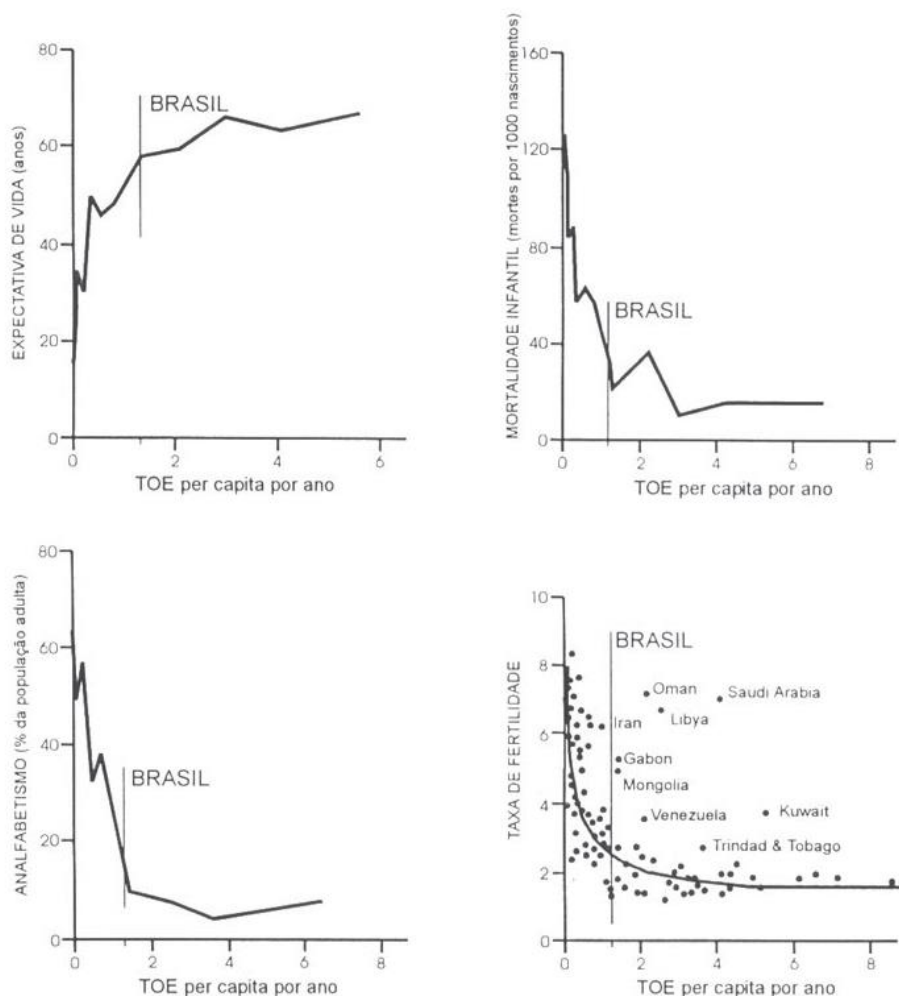
4.3.1	Resumo dos Estudos de Casos	87
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	96
	ANEXO A – COMPETÊNCIA DAS PESSOAS.....	99
	ANEXO B – RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO CORPO HUMANO	99
	ANEXO C – CONTATO DAS PESSOAS COM O POTENCIAL DE TERRA.....	100
	ANEXO D – DADOS CARACTERÍSTICOS DE TRANSFORMADORES	100
	ANEXO E – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS CONDUTORES MULTIPLEXADOS CA/CAL ISOLADOS COM NEUTRO NU – XLPE 0,6/1 KV	101
	ANEXO F – IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA DE CABOS	101

1 INTRODUÇÃO

Um importante destaque para o impacto da energia elétrica no desenvolvimento social foi retratado, em 1998, por José Goldemberg, na revista Energia e desenvolvimento, Figura 1 (GOLDEMBERG, 1998).

Na maioria dos países, nos quais o consumo de energia comercial per capita está abaixo de uma tonelada equivalente de petróleo (TEP) por ano, as taxas de analfabetismo, mortalidade infantil e fertilidade total são altas, enquanto a expectativa de vida é baixa. Ultrapassar a barreira 1 TEP/capita parece ser, portanto, essencial para o desenvolvimento. À medida em que o consumo de energia comercial per capita aumenta para valores acima de 2 TEP (ou mais), como é o caso dos países desenvolvidos, as condições sociais melhoram consideravelmente. O consumo médio per capita nos países industrializados da União Europeia é de 3.22 TEP/capita; a média mundial é de 1.66 TEP/capita.

Figura 1 – Relação entre indicadores sociais e o consumo per capita de energia

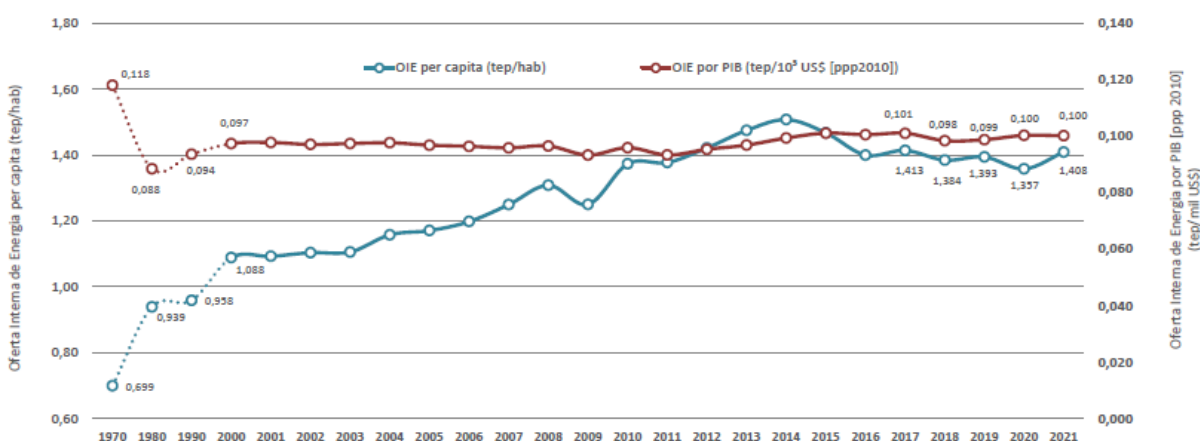


Fonte: Goldemberg, 1998.

De acordo com o autor, em 1998, o Brasil, com consumo igual 1,3 Tep por habitante por ano, encontrava-se em uma posição razoável no cenário internacional. Neste período, de acordo com a Figura 1, os indicadores sociais eram: expectativa de vida era abaixo de 60 anos, mortalidade infantil, inferior a 40 mortes por mil nascimentos, o analfabetismo não ultrapassava a 20% dos adultos, enquanto a taxa de fertilidade era inferior a 3 filhos por mulher. De acordo com IBGE (2020), por sua vez, em 2000, a expectativa de vida era de 69,8 anos, enquanto a mortalidade infantil era de 29 crianças por mil nascimentos.

A evolução dos indicadores oferta interna de energia (OIE) per capita e oferta interna pelo Produto Interno Bruto (PIB) entre 1970 e 2021 pode ser observado na Figura 2.

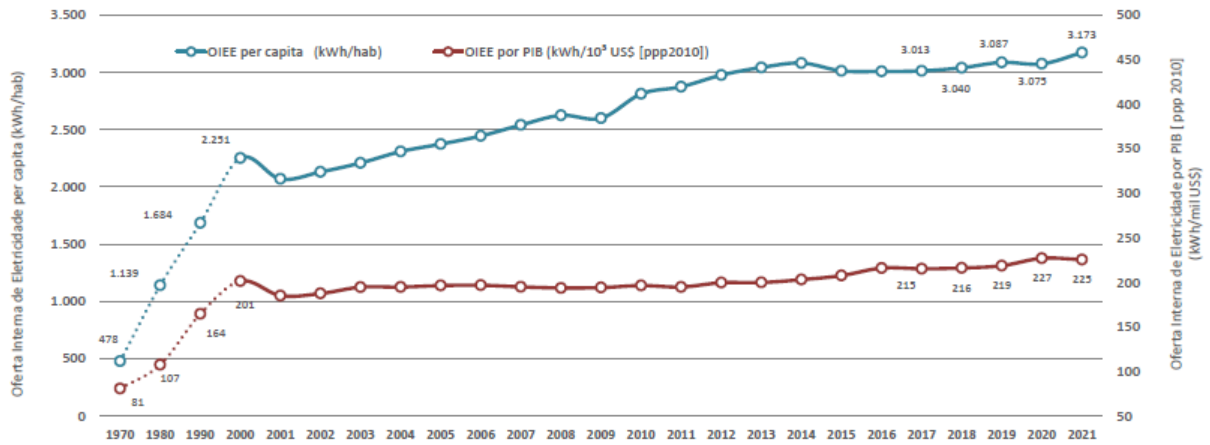
Figura 2 – Evolução dos indicadores de energia oferta interna per capita e oferta interna por PIB entre 1970 e 2021



Fonte: EPE (2022a).

Na Figura 2 pode se observar uma pequena variação da oferta de energia per capita, dada pelo crescimento proporcional da oferta e da população brasileira ao longo dos anos. Quando a energia analisada é a elétrica, a curva apresenta-se diferente, conforme a Figura 3.

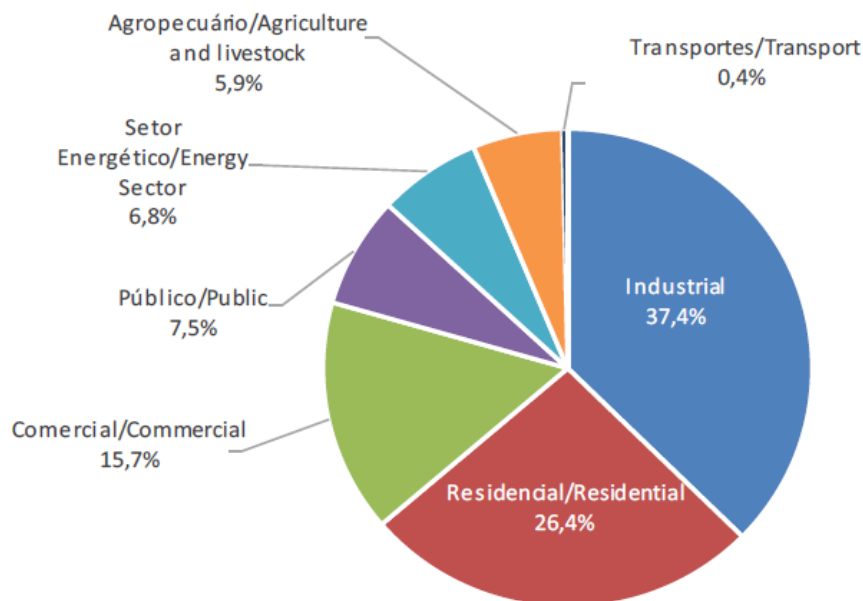
Figura 3 – Evolução dos indicadores de energia elétrica oferta interna per capita e oferta interna por PIB entre 1970 e 2021



Fonte: EPE (2022a).

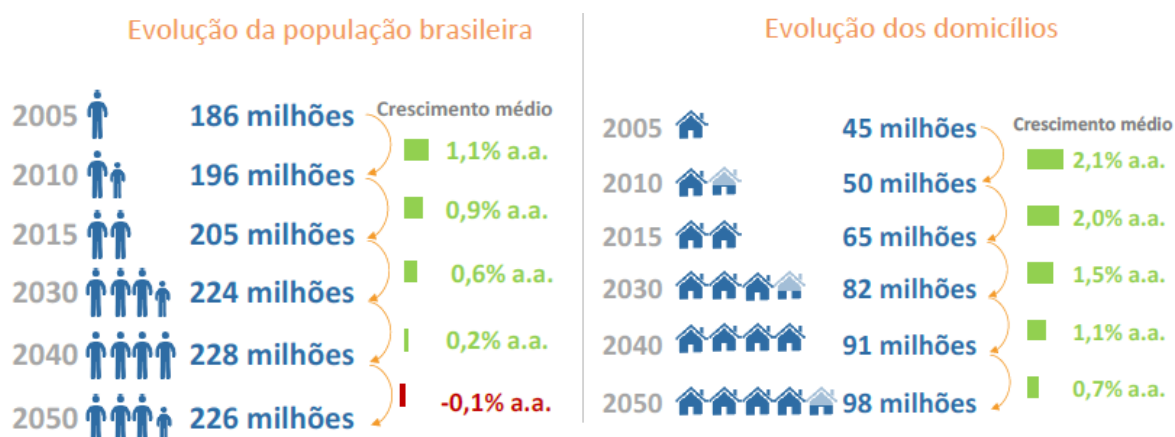
Enquanto se observa a variação da oferta interna de eletricidade pelo PIB nos últimos 21 anos de 201 a 225 kWh/mil.US\$, um aumento de 11,9 % (crescimento anual médio de 0,5%), a oferta interna de eletricidade por habitante variou entre 2.251 e 3.173 kWh/hab, ou seja, 40,9 % (crescimento anual médio de 1,9%). Por fim, a Figura 4 apresenta a participação do setor residencial no consumo de eletricidade do Brasil 2021, enquanto a Figura 5 representa a evolução da população brasileira e no número de moradias.

Figura 4 – Participação setorial no consumo de eletricidade em 2021



Fonte: BEN (2022).

Figura 5 – Evolução na população e número de moradias do Brasil



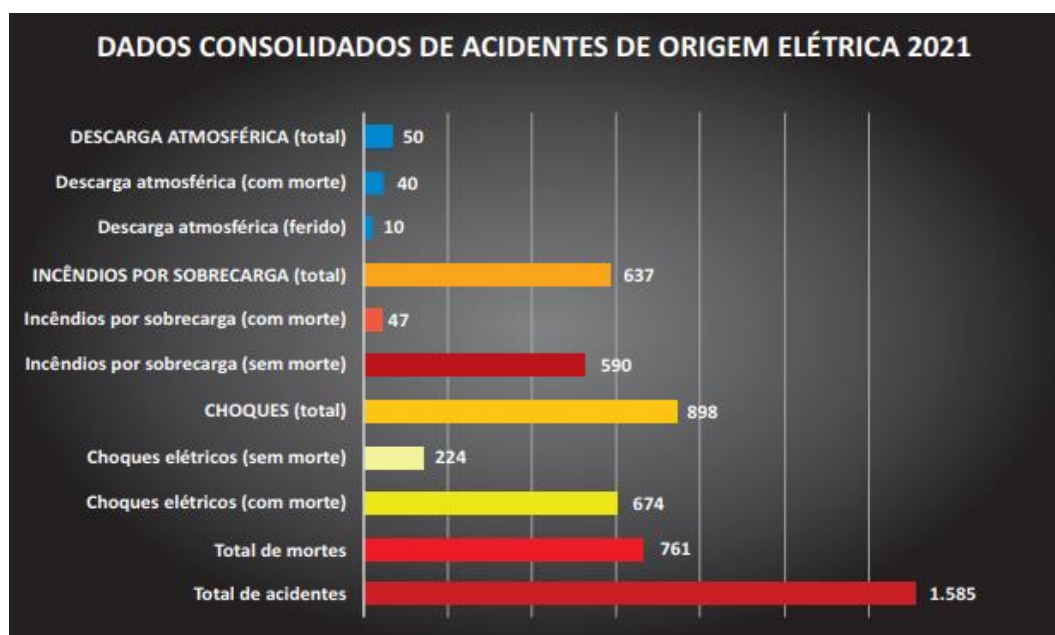
Fonte: BRASIL (2020).

Observa-se, na Figura 4 que, em 2021, o setor residencial representa o segundo maior consumidor de eletricidade com 26,4 %, alcançando 150,7 TWh dos 570,8 TWh consumidos no Brasil. O crescimento na população, conforme Figura 5, passou de 186 milhões em 2005 para 205 milhões em 2015, enquanto o número de residência cresceu de 45 milhões para 65 milhões, no mesmo período – um aumento anual médio de 1 % para o primeiro e 2,05 % para o segundo indicador.

Por fim, o crescimento do consumo de energia per capita de 0,699 em 1970 para 1,408 Tep em 2021, assim como a melhora no conjunto dos indicadores sociais expectativa de vida, mortalidade infantil e analfabetismo, destacam a relação e a importância da energia para a sociedade. O crescimento da demanda de eletricidade, associada, ainda, ao PIB, reafirma o benefício deste recurso para o conforto e bem estar das pessoas. Sobretudo, outros indicadores devem ser observados juntamente com o crescimento do uso da energia elétrica – os acidentes por choque elétrico, incêndio de origem elétrica e descarga atmosférica.

De acordo com o Anuário estatístico de acidentes de origem elétrica produzido pela Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (ABRACOPEL), Abracopel (2022), em 2021, houve no Brasil 1585 acidentes, sendo 674 fatais por choques elétricos, 47 por incêndio ocasionado devido à sobrecarga e 40 ocasionado por descarga atmosférica, Figura 6.

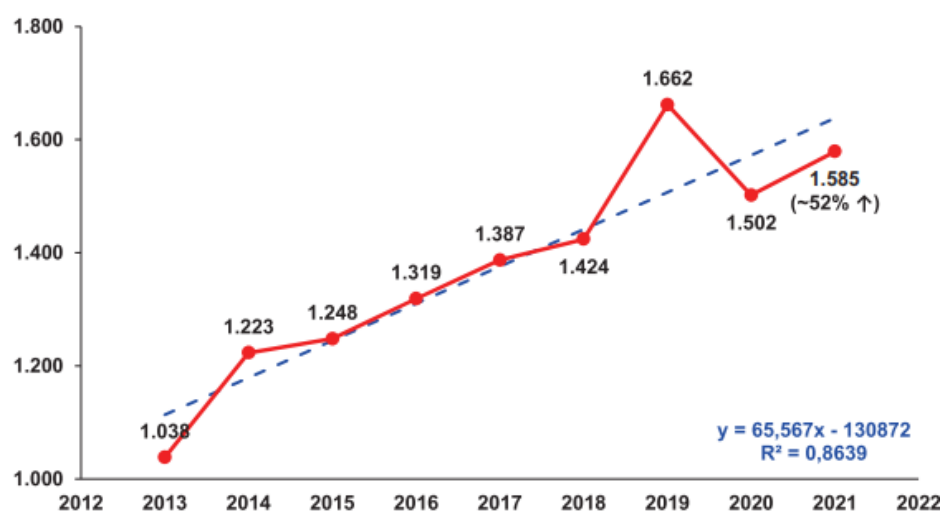
Figura 6 – Acidentes de origem elétrica no Brasil no ano 2021



Fonte: Abracopel (2022).

Destaca-se, assim, que, enquanto o aumento médio de eletricidade por habitante foi de 1,9 %, a população de 1,0 % e o número de moradias, 2,05 % ao ano, o número de mortes por acidentes de origem elétrica (choque, incêndio e descarga atmosférica) aumentou a uma taxa de 6,6 %, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Acidentes de origem elétrica no Brasil no período entre 2013 e 2021



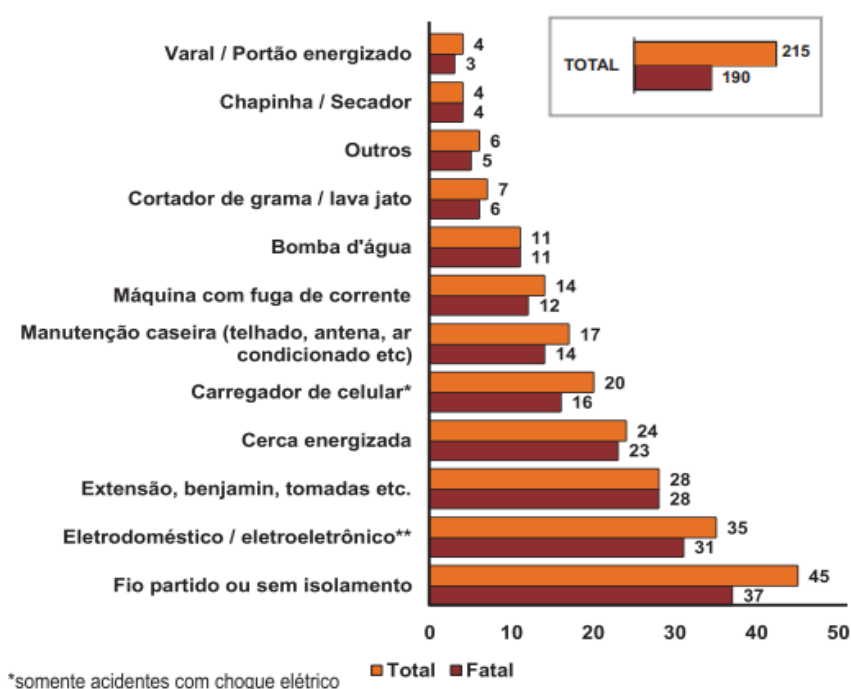
Fonte: Abracopel (2022).

Ainda sobre a Figura 6, enquanto morreram 40 pessoas por descargas atmosféricas, as mortes por incêndio devido sobrecarga elétrica chegaram a 47 e, por choque elétrico, alcançaram um total de 674 vítimas em 2021.

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO CHOQUE ELÉTRICO EM MORADIAS

De acordo com o ABRACOPEL (2022), Figura 8, as maiores causas de morte por choque elétrico em residência são: fio partido ou sem isolamento (37), (31), extensão, benjamin, tomadas etc. (28), cerca energizada (23), carregador de celular (16), dentre outros. Quando se busca identificar qual o equipamento eletrodoméstico e eletroeletrônico, o resultado é apresentado na Figura 9.

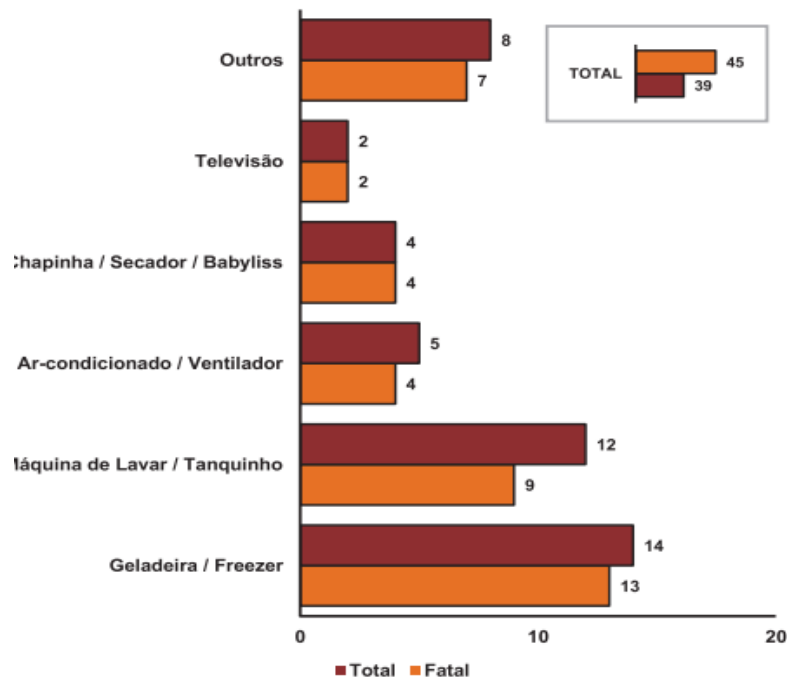
Figura 8 – Quantidade de choques elétrico total e fatal em residência por causa no ano 2021 no Brasil



Fonte: ABRACOPEL (2022).

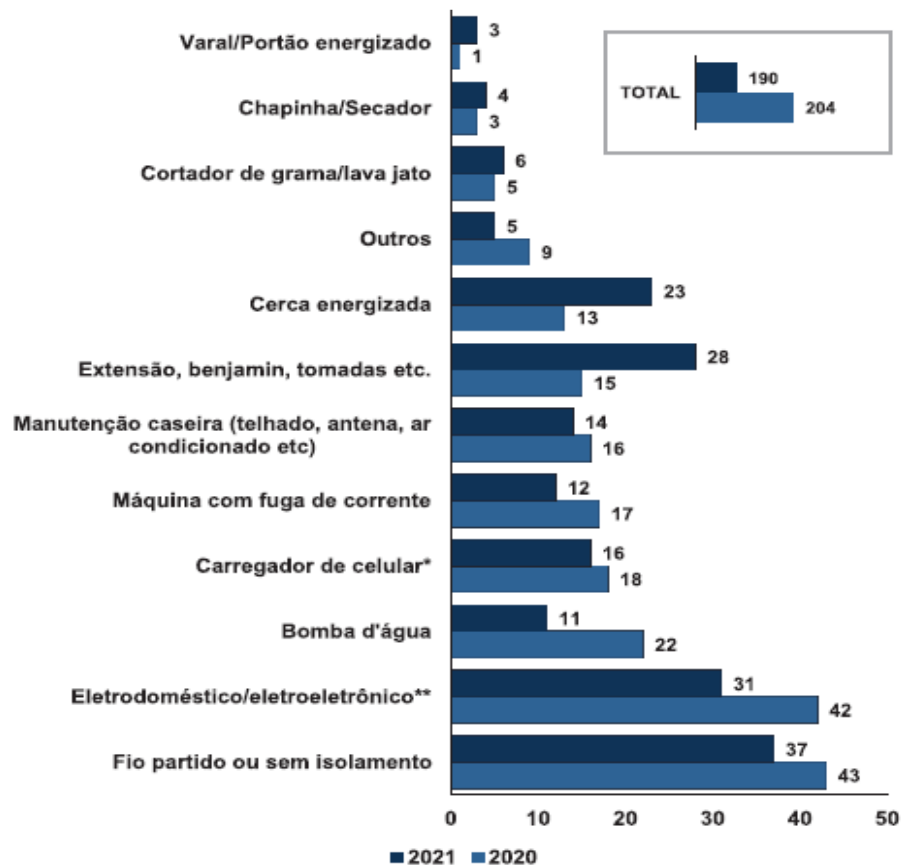
O destaque, conforme Figura 9, se dá primeiro para a geladeira/freezer (13), a máquina de lavar roupa/tanquinho, como 9 é o segundo, seguido por ar-condicionado/ventilador (4). Outro dado importante apresentado em ABRACOPEL (2022) é o comparativo dos acidentes fatais entre 2020 e 2021, apresentado na Figura 10, destacando pouca variação entre as mortes por equipamentos de um ano para o outro.

Figura 9 – Número de acidentes por choque elétrico em moradias no Brasil em 2021 por tipo de aparelho



Fonte: ABRACOPEL (2022).

Figura 10 – Variação do número de acidentes por choque elétrico em moradias no Brasil entre 2020 e 2021 por tipo de aparelhos



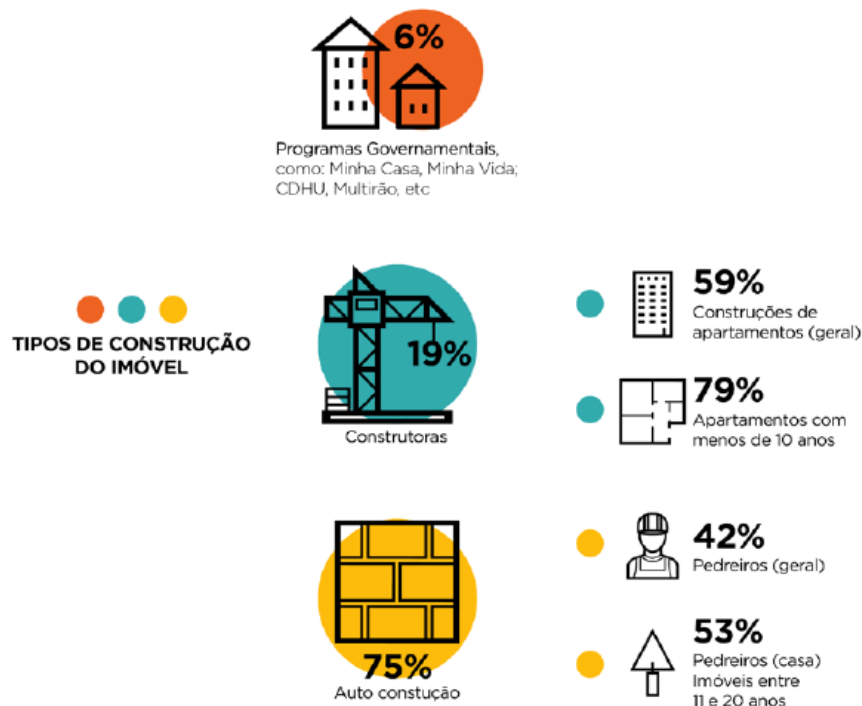
Fonte: ABRACOPEL (2022).

De acordo com ABRACOPEL (2022):

...geladeiras e máquinas de lavar têm sido os principais equipamentos em acidentes com eletrodomésticos em um ambiente residencial. Certamente, a ausência do Dispositivo Diferencial Residual (DR), obrigatório na instalação elétrica, mas ignorado por muitos, poderia ter salvado a maioria das vítimas. A falta desse dispositivo é motivada pelo desconhecimento do proprietário da residência e, algumas vezes, pelo descaso dos profissionais que deveriam sugerir a instalação e explicar a importância desse dispositivo nas instalações elétricas de uma residência.

De acordo com ABRACOPEL & PROCOBRE (2017), em seu trabalho “Raio x das instalações elétricas residenciais brasileiras”, com o objetivo de avaliar a evolução e aderência da conformidade das instalações elétricas residenciais em relação à Norma Brasileira de Instalações Elétricas de Baixa Tensão – ABNT NBR-5410, foi realizado, no 2º Semestre de 2016, uma pesquisa junto a 999 residências do país. Considerando que 75 % dos imóveis são de autoconstrução e, 53 %, tem entre 11 e 20 anos, surge a preocupação sobre as instalações elétricas e sua segurança, Figura 11.

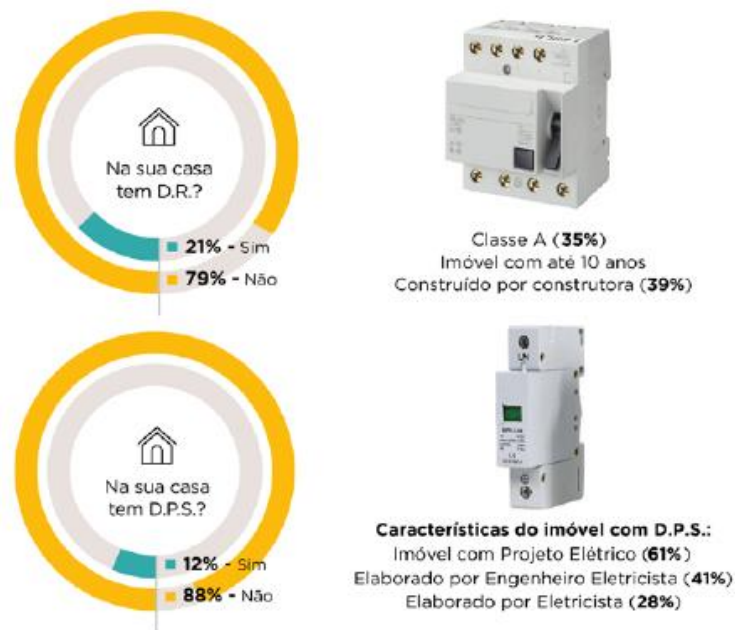
Figura 11 – Tipo de construção do imóvel pesquisado



Fonte: ABRACOPEL & PROCOBRE (2017).

Quando a pergunta tratou sobre a existência do projeto elétrico, somente 29 % respondendo positivamente e, destes, somente 34 % foram desenvolvidos por engenheiro eletricitista. A pergunta sobre os componentes de proteção – DR: Dispositivo diferencial residual e DPS: Dispositivo de Proteção conta surto – 21 % dos imóveis possuíam o primeiro, enquanto 12 % o segundo dispositivo, conforme Figura 12.

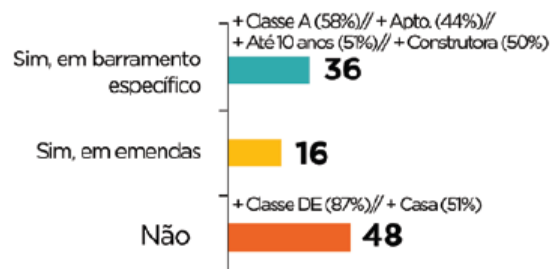
Figura 12 – Instalação de dispositivos de proteção DR e DPS nos imóveis no Brasil em 2016



Fonte: ABRACOPEL & PROCOBRE (2017).

Quando se investigou a existência de condutor de aterramento, somente 52 % possuíam, considerando, ainda, que a inexistência deste condutor se concentra em moradias utilizadas pela classe social D (87%).

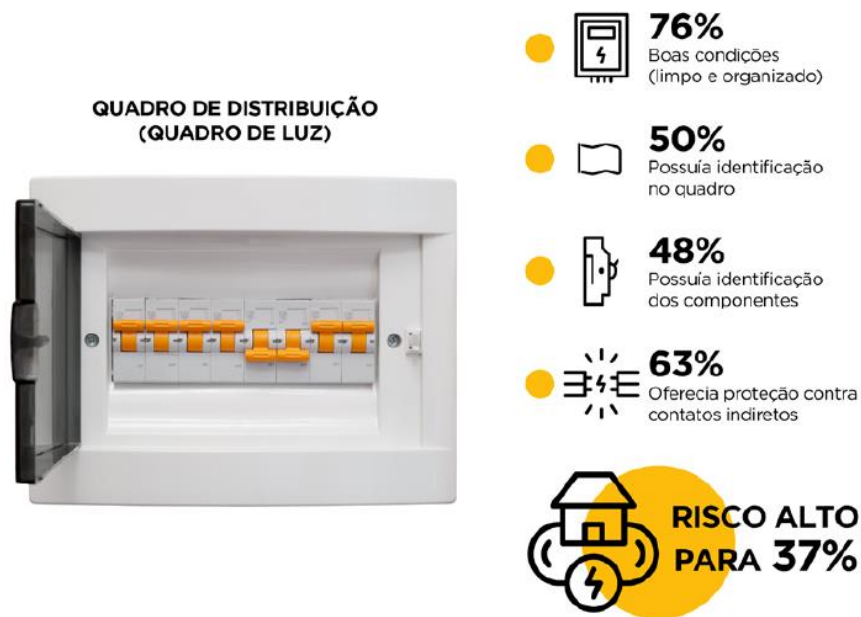
Figura 13 – Existência de condutor de aterramento nas moradias do Brasil em 2016



Fonte: ABRACOPEL & PROCOBRE (2017).

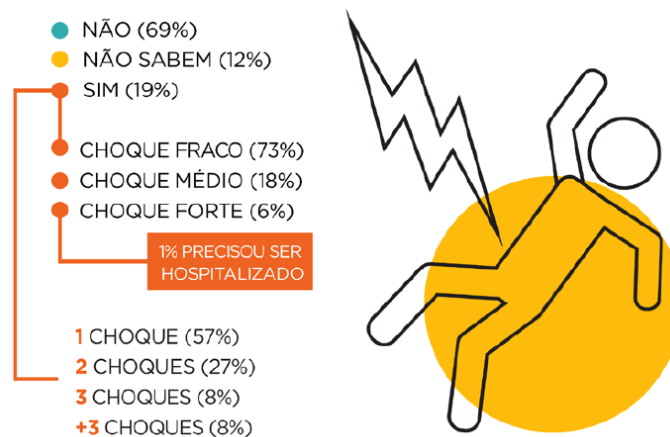
Por fim, para as condições dos quadros de distribuição, observou-se que 37 % apresentavam alto risco, associado a falta de proteção contra contato direto (Figura 14). Diante das condições apresentadas, por último, perguntou-se se alguém tomou choque na residência – 19 % tomaram choque, sendo que, 6 % foram fortes e, 1 % precisou ser hospitalizado, como pode se observar na Figura 15.

Figura 14 – Condições dos quadros de distribuição no Brasil em 2016



Fonte: ABRACOPEL & PROCOBRE (2017).

Figura 15 – Choques elétricos nas residências brasileiras



Fonte: ABRACOPEL & PROCOBRE (2017).

1.2 OBJETIVO GERAL

Considerando o crescimento dos acidentes por choque elétrico nas residências brasileiras, em especial, diante das condições de uma parte significativa das instalações elétricas – falta das proteções contra choque, inexistência do condutor de proteção e das condições do quadro de distribuição, este trabalho visa contribuir com o entendimento das implicações das condições citadas para a segurança contra choque elétrico nas moradias.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Entender e analisar a classificação das proteções básica, complementar e supletiva definidas pela ABNT NBR 5410 (2008): Instalações Elétricas de Baixa Tensão;
- Entender e analisar a corrente de choque elétrico, como se dá, qual sua intensidade, considerando, ainda, os efeitos no corpo humano;
- Discutir a abordagem da proteção contra choque elétrica definida em ABNT NBR 5410 (2008) e exemplificada em Cotrim (2009);
- Modelar configurações de circuitos para a determinação da corrente de choque elétrico, tensão de contato e corrente de curto-circuito para moradias em condições gerais no Brasil;
- Validar os modelos apresentados em três Estudos de Casos considerando seus circuitos equivalentes e os efeitos do choque elétrico no corpo humano devido à falta fase massa em um equipamento residencial;
- Discutir as contribuições do trabalho a partir da necessidade dos dispositivos de proteção, aterramento e quadro de distribuição como forma de contribuir para a redução dos acidentes de origem elétrica em moradias.

2 PROTEÇÃO CONTRA CHOQUES ELÉTRICOS EM RESIDÊNCIA

A Norma Brasileira Regulamentadora de Instalações elétricas de Baixa Tensão NBR 5410: 2008 estabelece as condições para garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens (ABNT NBR 5410, 2008). Segundo a norma, os princípios fundamentais, que relacionam a segurança no uso de uma instalação elétrica, são:

- Proteção contra choques elétricos;
- Proteção contra efeitos térmicos;
- Proteção contra sobrecorrentes;
- Circulação de correntes de falta;
- Proteção contra sobretensões;
- Serviços de segurança.

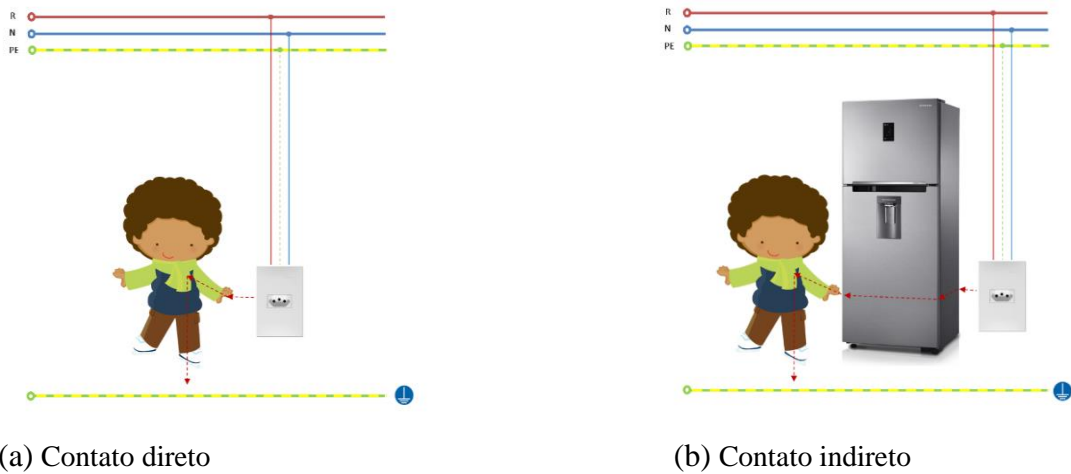
De acordo com Kitcher (2010), um sistema elétrico adequadamente projetado e executado deve apresentar proteção contra:

- Correntes de choque;
- Temperaturas excessivas;
- Explosão;
- Sub e sobretensão, juntamente com influências eletromagnéticas;
- Manuseio mecânico de equipamentos operados eletricamente;
- Arco ou queimadura;
- Interrupções na fonte de alimentação.

2.1 O CHOQUE ELÉTRICO

Os acidentes por choque elétrico podem ocorrer de dois modos, por contato direto ou por contato indireto, Figura 16 (a e b), respectivamente. O choque elétrico por contato direto: é quando a pessoa toca diretamente a parte energizados de uma instalação elétrica e, choque elétrico por contato indireto, quando há contato da pessoa ou animal com elementos que ficaram sob tensão devido a uma falha de isolamento. Os acidentes por contato direto são os mais graves, pois a tensão de contato é a própria tensão do ponto de utilização (127 V ou 220 V), uma vez que são originadas por falha de isolamento, extensões danificadas e tomadas e equipamentos com parte ativa exposta devido ruptura ou remoção indevida da proteção dos pontos energizados.

Figura 16 – Choque elétrico por contato direto e indireto

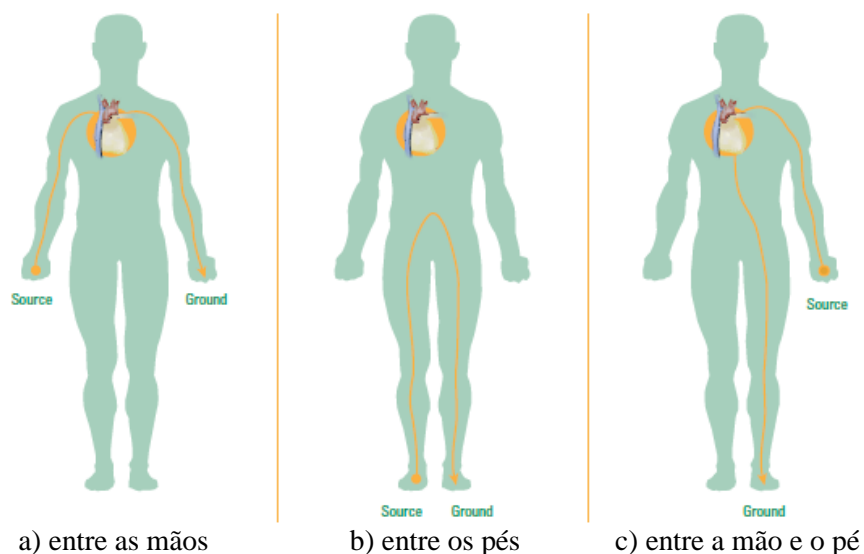


Fonte: Martim (2022).

Por outro lado, os acidentes por contato indireto, apresentam correntes de menor intensidade, uma vez que são oriundas da corrente através da resistência de peças condutoras ou pela concentração de cargas estáticas presentes em estruturas de equipamentos (COTRIM, 2009).

Além dos diferentes tipos de choque elétrico, de acordo com Kitcher (2010) há três caminhos considerados para a corrente elétrica no corpo humano: a) entre as mãos (potencial de toque); b) caminho entre os pés (potencial de passo) e c) caminho entre a mão e o pé (potencial de toque/passo), Figura 17.

Figura 17 – Caminhos da corrente elétrica no corpo humano



Fonte: Littelfuse (2022).

a) em um contato potencial de toque, a corrente passa de uma mão através do coração e para fora através da outra mão. Porque o coração e os pulmões estão no caminho da corrente, são consequências a fibrilação ventricular, dificuldade em respirar, como consequência leva a inconsciência ou pode ocorrer morte.

b) no potencial de passo a corrente atravessa os pés através das pernas. O coração não está no caminho direto da corrente, mas os músculos das pernas podem se contrair, fazendo com que a vítima fique paralisada momentaneamente.

c) em um contato potencial de toque/passos, a corrente passa de uma mão, através do coração, para a perna e o pé. O coração e os pulmões estão no caminho direto da corrente, então pode ocorrer fibrilação ventricular, dificuldade para respirar, colapso e inconsciência ou morte.

O choque elétrico é o efeito da passagem da corrente elétrica pelo corpo humano – acontece quando a diferença de potencial nos pontos de contato do corpo humano ou animal, considerando a resistência elétrica desses pontos e caminhos, resultam na movimentação dos elétrons, calculado pela lei de Ohm (a corrente elétrica é igual a relação entre a tensão e a resistência).

De acordo com *U.S. Department Labor* (2008), quando se analisa ferramentas portáteis, o autor descreve os efeitos da corrente no corpo humano:

Todos os anos, muitos funcionários sofrem choques elétricos ao usar ferramentas e equipamentos elétricos portáteis. A natureza dos ferimentos varia de queimaduras leves a eletrocussão. Choques elétricos produzidos por correntes alternadas (ac) na frequência da linha de energia passando pelo corpo de um adulto médio através da mão e do pé por 1 segundo podem causar vários efeitos, desde uma condição quase perceptível de 1 miliampere até a perda de controle muscular voluntário para correntes de 9 a 25 miliamperes. A passagem de correntes ainda mais altas, de 75 miliamperes até 4 amperes, pode produzir fibrilação ventricular do coração e, para correntes superiores a 4 amperes, parada cardíaca imediata.

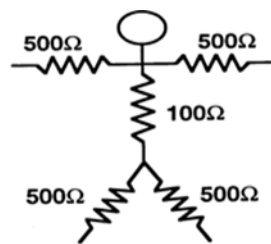
A intensidade da corrente depende da resistência do caminho da falha dentro da ferramenta (quando se trata de ferramentas), da resistência do caminho através do corpo, e da resistência dos caminhos, tanto do lado da linha quanto do lado do solo (U.S. DEPARTMENT LABOR, 2008):

A intensidade da corrente que flui através de um funcionário depende, principalmente, da resistência do caminho de falha dentro da ferramenta, da resistência do caminho através do corpo do funcionário, e da resistência dos caminhos, tanto do lado da linha quanto do lado do solo. A umidade na atmosfera pode contribuir para a falha elétrica, melhorando tanto o caminho condutor dentro da ferramenta quanto o caminho externo do solo de retorno à fonte de alimentação elétrica. A pele seca pode ter uma faixa de resistência de

cerca de 500 a 500.000 ohms e a pele molhada pode ter uma faixa de resistência de cerca de 200 a 20.000, dependendo de vários fatores, como as características físicas e a massa do funcionário. Maior corrente fluirá se o empregado estiver transpirando ou ficar molhado por causa das condições ambientais.

U.S. Department Labor (2008) apresenta, ainda, a resistência do corpo humano considerada para a avaliação da corrente de choque conforme a Figura 18. Considerando a resistência associada as pernas em paralelo somadas a do tronco mais a de um braço, 850 Ω , para as baixas tensões residenciais usuais no Brasil (127 V, 220V e 25 V: limite para o “*separated extra-low voltage (SELV)*” extra-baixa tensão eletricamente separada), resulta nos valores observados na Figura 18.

Figura 18 – Representação das resistências equivalentes do corpo humano e correntes de choque elétrico



Tensão (V)	Resistência (Ω)	Corrente (A)
25	850	0,029
127	850	0,149
220	850	0,259

Fonte: adaptado de U.S. Department Labor (2008).

Considerando a representação da Figura 18 é possível concluir que o contato entre as mãos resulta em uma resistência do corpo de 1.000 Ω , entre os pés, o mesmo valor de 1.000 Ω e entre a mão e os dois pés 850 Ω ou, ainda, duas mãos e dois pés, 600 Ω , obtidos a partir da associação em série e paralelo do circuito.

Cotrim (2009), por sua vez, apresenta o efeito da corrente elétrica no corpo humano através de cinco zonas no gráfico tempo por corrente de choque elétrico, Figura 19.

A Zona 1 é aquela em que a corrente elétrica não produz reação alguma no corpo humano. Situa-se abaixo do chamado limiar de percepção (0,5 mA). É importante salientar que esse valor varia de acordo com a pessoa, sendo menor para mulheres e crianças.

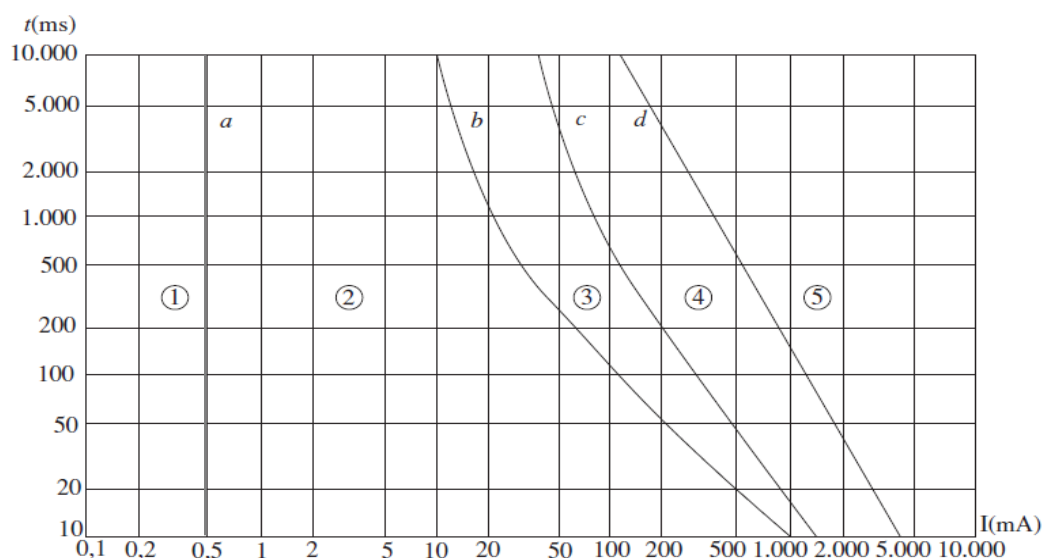
A Zona 2 é aquela em que a corrente não produz nenhum efeito fisiopatológico perigoso. Está entre o limiar de percepção e a curva limite de corrente fisiopatologicamente perigosa (curva b)...

Na Zona 3, compreendida entre a curva b e a curva c, não há risco de fibrilação ventricular, mas a corrente pode provocar outros inconvenientes — de modo geral, não perigosos — caso a duração da corrente não seja longa. Nessa zona, se a duração for muito extensa, há possibilidades de problemas respiratórios.

Na Zona 4, a corrente do choque elétrico pode provocar fibrilação ventricular, com uma probabilidade que vai de 0,5 por cento (curva c) a 50 por cento (curva d).

Na Zona 5, situada após a curva d, há o perigo efetivo da ocorrência de fibrilação ventricular.

Figura 19 – Zonas de efeito de corrente alternada em 50 ou 60 Hz sobre adultos



Notas: 1. No que diz respeito à fibrilação ventricular, a Figura 19 relaciona-se com os efeitos da corrente que passa no trajeto “mão esquerda/pés”.

2. No ponto 500 mA/100 ms há probabilidade de 0,14% de ocorrer fibrilação.

Fonte: Cotrim (2009)

2.1.1 Proteção contra choques elétricos

De acordo com ABNT NBR 5410 (2008), em seu item 3.2, a proteção contra choques elétricos é dividida em:

3.2.2 proteção básica: meio destinado a impedir contato com partes vivas perigosas em condições normais.

3.2.3 proteção supletiva: meio destinado a suprir a proteção contra choques elétricos quando massas ou partes condutivas acessíveis tornam-se acidentalmente vivas.

3.2.4 proteção adicional: meio destinado a garantir a proteção contra choques elétricos em situações de maior risco de perda ou anulação das medidas normalmente aplicáveis, de dificuldade no atendimento pleno das condições de segurança associadas a determinada medida de proteção e/ou, ainda, em situações ou locais em que os perigos do choque elétrico são particularmente graves.

3.2.5 dispositivo de proteção a corrente diferencial-residual (dispositivo DR): dispositivo de seccionamento mecânico ou associação de dispositivos destinada a provocar a abertura de contatos quando a corrente diferencial-residual atinge um valor dado em condições especificadas.

3.2.6 SELV (do inglês “*separated extra-low voltage*”): sistema de extra-baixa tensão que é eletricamente separado da terra, de outros sistemas e de tal modo que a ocorrência de uma única falta não resulta em risco de choque elétrico.

3.2.7 PELV (do inglês “*protected extra-low voltage*”): sistema de extra-baixa tensão que não é eletricamente separado da terra, mas que preenche, de modo equivalente, todos os requisitos de um SELV.

Cotrim (2009) classifica os métodos de proteção contra choques elétricos pela proteção (básica – contatos diretos) e supletiva (contatos indiretos) e, estas, pelo tipo: completa, parcial ou adicional. O autor dispõe, considerando ABNT NBR 5410 (2008), sobre a condição passiva e ativa, cujo resumo é apresentado no Quadro 1:

a proteção passiva consiste em limitar a corrente elétrica que pode atravessar o corpo humano ou em impedir o acesso de pessoas a partes vivas. São medidas que não levam em conta a interrupção de circuitos com falta. A proteção ativa consiste na utilização de métodos e dispositivos que proporcionam o seccionamento (abertura) automático de um circuito, sempre que houver faltas que possam trazer perigo para o operador ou usuário... As proteções básica e supletiva combinadas (contra contatos diretos e indiretos), têm como base o uso de tensões extra-baixas e pode ser realizada por: tensão extra-baixa de segurança (SELV) e tensão extra-baixa funcional (PELV).

Quadro 1 – Classificação dos métodos de proteção contra choques elétricos

Proteção	Tipo	Passiva	Ativa
Básica (contatos diretos)	Medida de proteção completa	Isolação das partes vivas	Limitação de tensão (SELV, PELV)
		Barreiras ou invólucros	
	Medida de proteção parcial	Obstáculos Colocação fora do alcance de pessoas	-
	Medida de proteção adicional	-	Dispositivos de proteção à corrente diferencial-residual de alta sensibilidade
Supletiva (contatos indiretos)	-	Equipotencialização	Seccionamento automático, limitação de tensão (SELV, PELV)
		Isolação dupla ou reforçada	
		Separação elétrica	
		Locais não condutivos	

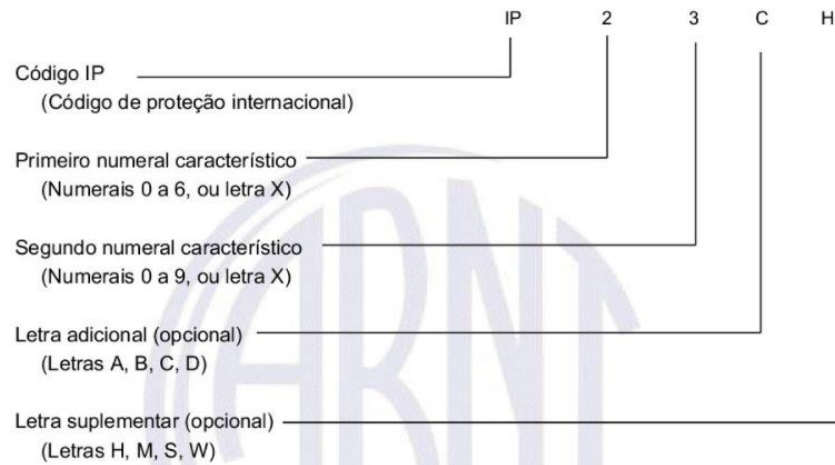
Fonte: Cotrim, (2009).

Observa-se, aqui, que não serão abordados os sistemas SELV e PELV, por não serem de uso comum às instalações elétricas residenciais, ainda que sejam utilizados em banheiras e piscinas.

2.1.1.1 Proteção básica contra choques elétricos

A proteção básica contra choques elétricos, considerando as barreiras ou invólucros, pode ser analisada a partir da norma ABNT NBR IEC 60529: 2017 – Graus de proteção providos por invólucros (códigos IP) (ABNT NBR IEC 60529: 2017). Esta norma define a proteção de pessoas contra o acesso às partes perigosas no interior do invólucro, os graus de proteção, os requisitos para cada designação e os ensaios. Os graus de proteção relativos à proteção básica – contato e ingresso de sólidos estranhos estão representados no primeiro algarismo (Figuras 20 e 21).

Figura 20 – Disposição dos números e letras do código de proteção IP



Fonte: ABNT NBR IEC 60529: 2017.

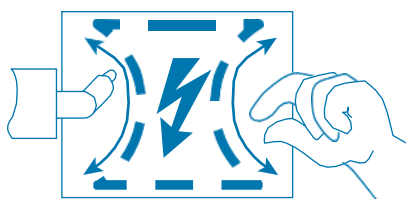
Figura 21 – Disposição dos números e letras do código de proteção IP

Elemento	Numeral ou letras	Significado para proteção do equipamento	Significado para proteção de pessoas	Ref.
Código de letras	IP	–	–	–
Primeiro numeral característico	0 1 2 3 4 5 6	Contra o ingresso de objetos sólidos estranhos (não protegido) ≥ 50 mm de diâmetro ≥ 12,5 mm de diâmetro ≥ 2,5 mm de diâmetro ≥ 1 mm de diâmetro protegido contra poeira totalmente protegido contra poeira	Contra o acesso às partes perigosas com: (não protegido) dorso da mão dedo ferramenta fio fio fio	Seção 5

Fonte: ABNT NBR IEC 60529: 2017.

Observa-se que, para evitar o contato, deve-se prever a proteção IP2X, que prevê a proteção contra objetos maiores ou iguais a 12,5 mm de diâmetro e a proteção do dedo de uma pessoa. De acordo com Kitcher (2010), esta proteção indica que uma pessoa não pode tocar uma parte energizada (viva) através da abertura, Figura 22.

Figura 22 – Teste e equipamento para verificação dos graus de proteção contra contato IP_



Fonte: Kitcher (2010) e Pego Group (2022).

2.1.1.2 Proteção supletiva contra choques elétricos

A proteção supletiva busca garantir a segurança em caso de falha, levando ao desligamento automático, bem como a limitação da tensão (SELV e PELV) não abordados neste trabalho. São definidos como medida de proteção supletiva a equipotencialização, seccionamento automático da alimentação, a isolação complementar e a separação elétrica. De acordo com ABNT NBR 5410 (2008),

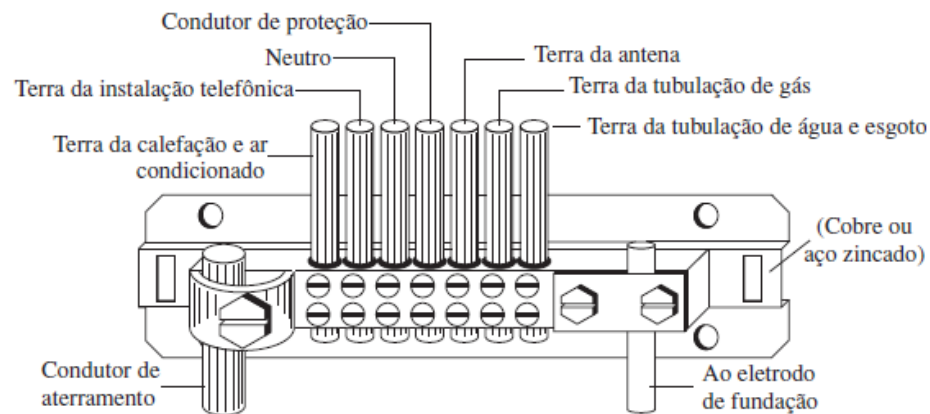
a equipotencialização e o seccionamento automático da alimentação se completam, de forma indissociável, porque, quando a equipotencialidade não é o suficiente para impedir o aparecimento de tensões de contato perigosas, entra em ação o recurso do seccionamento automático, promovendo o desligamento do circuito em que se manifesta a tensão de contato perigosa.

De acordo com Kitcher (2010), a função da proteção supletiva é impedir que uma corrente passe pelo corpo de pessoas ou animais, mas, caso passe, ocorra uma limitação de intensidade e duração através de um dispositivo de proteção: todo circuito deve ter um dispositivo de proteção e aterramento adequado.

Conforme ABNT NBR 5410 (2008), em seu item 3.3.1, a equipotencialização é definida como um procedimento que tem o intuito de fazer a interligação de elementos especificados, propondo obter o mesmo potencial necessário para os fins desejados. A Figura 23 e Kitcher (2010) esclarecem o exposto, considerando que:

Todas as partes condutoras estranhas dentro de uma instalação devem ser conectadas ao terminal de aterramento principal... incluem as seguintes. (i) Tubos de água... (ii) Tubos de gás... (iii) Qualquer outra tubulação de instalação ou dutos que possam entrar em contato com partes condutoras expostas. Isso inclui sistemas de aquecimento centrais e ar-condicionado. (iv) Partes estruturais metálicas expostas do prédio... (v) Sistemas de proteção contra raios...

Figura 23 – Barramento de equipotencialização principal (BEP)



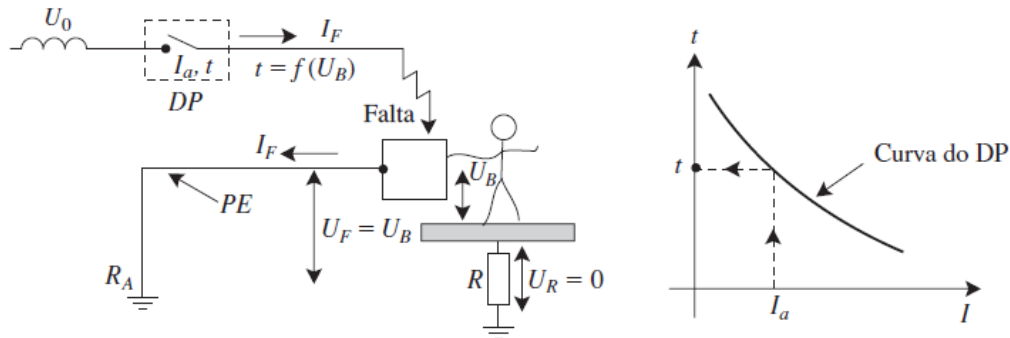
Fonte: Cotrim (2009).

A Figura 24 auxilia o entendimento do item 5.1.2.2.4 da NBR 5410 (2008), que define:

Um dispositivo de proteção deve seccionar automaticamente a alimentação do circuito ou equipamento por ele protegido sempre que uma falta (entre parte viva e massa ou entre parte viva e condutor de proteção) no circuito ou equipamento der origem a uma tensão de contato superior ao valor pertinente da tensão de contato limite UL;

As características do dispositivo de proteção e a impedância do circuito devem ser tais que, ocorrendo em qualquer ponto uma falta de impedância desprezível entre um condutor de fase e o condutor de proteção ou uma massa, o seccionamento automático se efetue em um tempo no máximo igual ao especificado....

Figura 24 – Representação da proteção supletiva por seccionamento automático

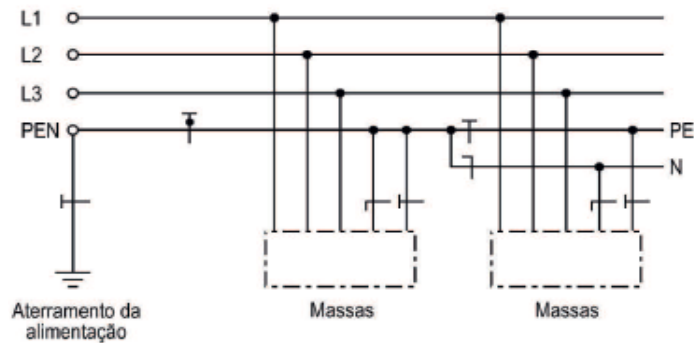


Legenda: U_0 – tensão de alimentação; (DP) - dispositivo de proteção; (I_a) - corrente de atuação para o tempo (t); (I_F) – corrente de falta; ($t = f(U_B)$) – o tempo de atuação é função da tensão de contato presumida (U_B); ($U_F = U_B$) – tensão de falta que é igual a U_B quando $U_R = 0$ (tensão entre o elemento condutor e a terra); (R) – resistência entre o elemento condutor e a terra; (PE) – condutor de proteção; (R_A) – resistência do aterramento

Fonte: Cotrim (2009).

A análise apresentada aqui considera o esquema de aterramento TN-C-S (um caso particular do TN), por ser o método de ligação normalmente utilizado para instalações das moradias. No esquema TN-C-S as funções de neutro e proteção são comuns em um único condutor em parte do circuito e separada no final, Figuras 25 (ABNT NBR 5410, 2008).

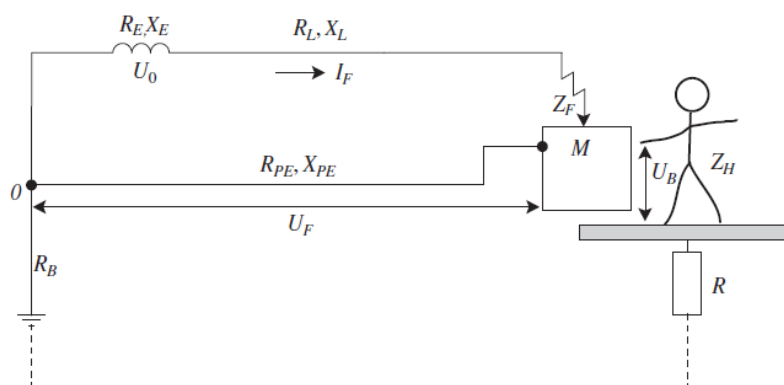
Figura 25 – Esquema de ligação de aterramento tipo TN-C-S



Fonte: ABNT NBR 5410:2008.

Considerando o equacionamento de Cotrim (2009), em um sistema de aterramento TN, a partir da simplificação apresentada pelo autor, para a determinação da tensão de contato presumida (U_B) considera a Figura 26.

Figura 26 – Circuito equivalente para determinação da tensão de contato presumida



Legenda: (R_E, X_E) (R_L, X_L) (R_{PE}, X_{PE}) – Resistência e Reatância do transformador, da linha e do condutor de proteção; (U_0) – tensão de alimentação; (Z_F) – impedância de falta; (M) – massa; (U_B) – tensão de contato presumida; (Z_H) – impedância do corpo humano; (U_F) – tensão de falta; (R_B) – Resistência de aterramento; (R) – resistência entre o elemento condutor e a terra.

Fonte: Cotrim (2009).

De acordo como ABNT NBR 5410 (2008), em seu anexo C, as influências externas e a proteção contra choques elétricos são caracterizadas considerando: C.1 Influências externas determinantes, C.2 Situações 1, 2 e 3 e C.3 Tensão de contato limite. A influência externa determinante, por sua vez, é definida pela competência das pessoas (BA), resistência do corpo humano (BB) e contato das pessoas com o potencial da terra (BC) que estão disponíveis nos Apêndices A, B e C.

As situações 1, 2, 3, em seu tempo, são definidas pela combinação das influências externas determinantes BB e BC, prevalecendo a mais severa, conforme Quadro 2. De acordo com ABNT NBR 5410 (2008), são exemplos da situação 2 as áreas externas (jardins, feiras etc.), canteiros de obras, estabelecimentos agropecuários, áreas de acampamento (campings) e de estacionamento de veículos especiais e reboques (trailers), volume 1 de banheiros (volume definido pela área do rebaixo do box mais faixa de 0,6m) e piscinas, compartimentos condutivos, dependências interiores molhadas em uso normal; e da situação 3, que corresponde aos casos de corpo imerso, é o do volume zero de banheiros (onde a área do rebaixo do box é a base do volume) e piscinas.

Quadro 2 – Definição das situações 1, 2 e 3 das influências externas para a proteção contra choques elétricos

Condição de influência externa	Situação
BB1, BB2	Situação 1
BC1, BC2, BC3	Situação 1
BB3	Situação 2
BC4	Situação 2
BB4	Situação 3

Fonte: ABNT NBR 5410 (2008).

Para finalizar, a tensão de contato limite (C.3) é definida pela Tabela 1 conforme ABNT NBR 5410 (2008). A partir a Tabela 1, observa-se que o ambiente interno de uma residência, considerado como “Situação 1”, tem seu limite de tensão de contato igual a 50 V, o ambiente externo e o volume 1 do banheiro (box mais 0,6 m) tem seu limite igual a 25 V e, por fim, o volume definido pela área do box, limite máximo de 12 V. Por fim, ultrapassando-se a tensão limite definida pela resistência do corpo humano em função da característica do ambiente (BBx), contato com o potencial de terra (BCx), é obrigatória a instalação de dispositivos de seccionamento automático para a proteção das pessoas contra choque contra contato indireto como medida de proteção supletiva.

Tabela 1 – Valores da tensão de contato limite U_L (V)

Natureza da corrente	Situação 1	Situação 2	Situação 3
Alternada, 15 Hz - 1 000 Hz	50	25	12
Contínua sem ondulação ¹⁾	120	60	30

Nota: 1) Uma tensão contínua "sem ondulação" é convencionalmente definida como apresentando uma taxa de ondulação não superior a 10% em valor eficaz; o valor de crista máximo não deve ultrapassar 140 V, para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 120 V nominais, ou 70 V para um sistema em corrente contínua sem ondulação com 60 V nominais.

Fonte: ABNT NBR 5410 (2008).

Ainda de acordo com ABNT NBR 5410 (2008), a condição que deve ser mantida pelo dispositivo de seccionamento automático é a limitação do tempo, considerando, agora, como valor máximo a tensão nominal da rede ($Z_s \cdot I_a \leq U_o$):

Considera-se a prescrição atendida se a seguinte condição for satisfeita: $Z_s \cdot I_a \leq U_o$; onde: Z_s é a impedância, em ohms, do percurso da corrente de falta, composto da fonte, do condutor vivo, até o ponto de ocorrência da falta, e do condutor de proteção, do ponto de ocorrência da falta até a fonte; I_a é a corrente, em ampères, que assegura a atuação do dispositivo de proteção num tempo no máximo igual ao especificado na Tabela 2, ou a 5 s, nos casos

previstos no parágrafo a seguir; U_0 é a tensão nominal, em volts, entre fase e neutro, valor eficaz em corrente alternada...

c) tempos de seccionamento maiores (I) – Independentemente do esquema de aterramento, admite-se um tempo de seccionamento maior que os tratados na Tabela 2, mas não superior a 5 s, para circuitos de distribuição, bem como para circuitos terminais que alimentem unicamente equipamentos fixos, desde que uma falta no circuito de distribuição, circuito terminal ou equipamento fixo (para os quais esteja sendo considerado o tempo de seccionamento de até 5 s) não propague, para equipamentos portáteis ou equipamentos móveis deslocados manualmente em funcionamento, ligados a outros circuitos terminais da instalação, uma tensão de contato superior ao valor pertinente de UL. (Adaptação pela autora).

Tabela 2 – Tempos de seccionamento máximo para esquema de ligação TN

U_0 [V]	Tempo de seccionamento [s]	
	Situação 1	Situação 2
115, 120, 127	0,80	0,35
220	0,40	0,20
254	0,40	0,20
277	0,40	0,20
400	0,20	0,05

Notas: 1 – U_0 é a tensão nominal entre fase e neutro, valor eficaz em corrente alternada;

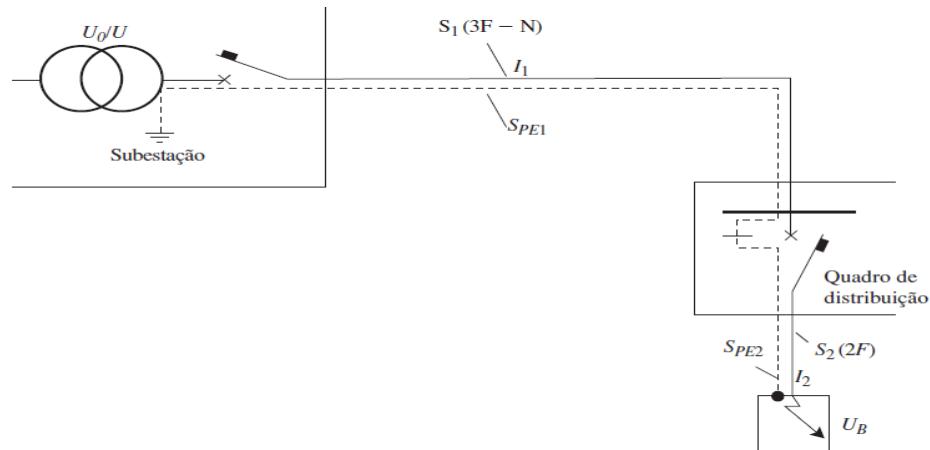
2 – As situações 1 e 2 estão definidas no anexo A, B e C e no Quadro 2.

Fonte: Adaptado de ABNT, (2008).

Entende-se, então, que em uma residência, poucos são os equipamentos fixos que não possuem cabo flexível e ligação por plug e tomada, e que poderiam ter tempo de atuação do dispositivo de seccionamento de até 5 s, como exemplo, o condicionador de ar com conexão elétrica não aparente. Lembra-se, aqui, que o chuveiro elétrico, que não pode ser movido do local em funcionamento, encontra-se na “Situação 3”, sendo considerada insuficiente a equipotencialização e o seccionamento automático como medida de proteção contra choque (ABNT NBR 5410, 2008).

Cotrim (2009) apresenta a análise do tempo de atuação de um disjuntor padronizado pela norma NBR NM 60898/2004 – Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares, (ABNT NBR NM 60898, 2004). A análise considera a corrente de falta do trecho de instalação apresentado na Figura 27, onde um transformador alimenta um circuito terminal a partir de uma rede de distribuição.

Figura 27 – Diagrama para análise do tempo de atuação e tensão de falta U_B



Legenda: (U_0/U) tensão fase-neutro e tensão fase-fase (220/380) do circuito de distribuição; $S_1(3F-N)$ Seção dos condutores do circuito trifásico com neutro (3(35 mm²-35 mm²)); (S_{PE1}) Seção do condutor de proteção 16 mm²; $S_2(2F)$ e S_{PE2} Seção dos condutores fase e neutro e de proteção do circuito terminal 4,0 mm²; I_2 – corrente de falta; (U_B) Tensão de contato presumida.

Fonte: Cotrim (2009).

Da análise, o autor obteve o tempo de atuação de 0,4 s para a situação 1 e 0,2 s para a situação a partir da Tabela 2 e a tensão U_0 de 220 V para equipamentos móveis, 5 s para ligações fixas, a impedância em série do transformador, dos condutores de distribuição e terminal considerando o caminho definido pela proteção Z_S igual a $0,59 + j 0,06 \Omega$, ou ainda, $0,59 \Omega$.

A verificação da proteção supletiva considerando o seccionamento automático se dá pela desigualdade da Equação 1 a partir da curva característica do disjuntor apresentada na Figura 28.

$$Z_S \cdot I_a \leq U_0 \quad (1)$$

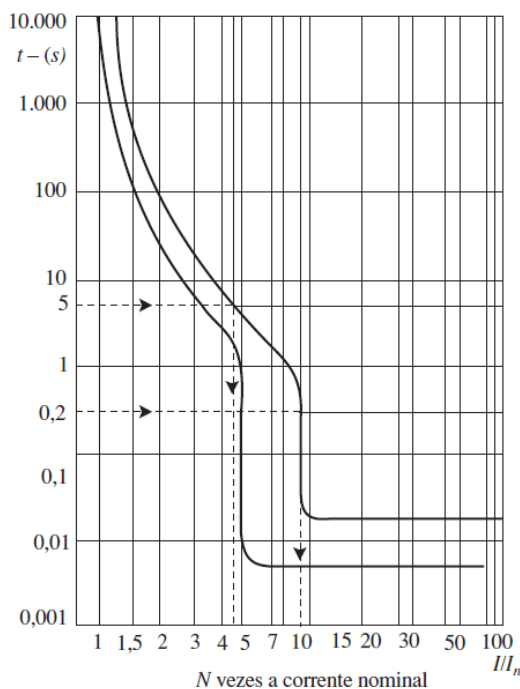
Onde:

Z_S – impedância do circuito da falta (Ω);

I_a – corrente que assegura a atuação do dispositivo de proteção (A);

U_0 – tensão entre fase e neutro do circuito (V).

Figura 28 – Curva característica típica de atuação de um disjuntor conforme a norma ABNT NBR 60898:2004



Fonte: Cotrim (2009).

Sendo o disjuntor do circuito terminal de 25 A e, considerando o tempo apresentado de 0,2 s e 5 s, tem-se a corrente de 112,5 A e 250 A, uma vez que o eixo das abscissas é dado por N vezes a nominal. Para os valores obtidos no gráfico tem-se, então, a partir da Equação 1, 147,5 V e 66,4 V para os tempos 0,2 s e 5 s, respectivamente. O autor conclui que a desigualdade é satisfeita, e o dispositivo escolhido é adequado para proteção supletiva contra choque elétrico, uma vez que em ambos os casos é inferior a 220 V. Em outra análise, Cotrim (2009) ainda define a impedância máxima do circuito de falta para cada corrente de disjuntor, para a tensão 127V e 220 V a partir do tempo de desarme de 5 s.

Considerando a discussão apresentada, conclui-se, que, apesar da proteção contra choque elétrico supletiva para contato indireto por seccionamento automático ser possibilitada por ABNT NBR 5410 (2008), há uma faixa de valores de impedância de falta que não satisfazem o tempo estabelecido. O circuito de falta depende da impedância do transformador, dos condutores e, em especial, pode ser somada a resistência associada ao caminho da corrente pela massa do equipamento em falta, de forma a ultrapassar o limite definido e comprometer a proteção contra choque elétrico. Cotrim (2009) conclui que,

apesar de admitidos pela norma e serem uma solução de custo relativamente mais baixo, deve-se ressaltar que tais dispositivos não foram inventados para

a proteção contra choques elétricos, mas, sim, como o próprio nome indica, foram desenvolvidos para a proteção contra sobrecorrentes de condutores e equipamentos elétricos. Dessa forma, seu uso como medida de proteção contra choques elétricos deve ser cercado de todo o cuidado.

ABNT NBR 5410 (2008) determina, por sua vez, a obrigatoriedade da proteção contra contatos indiretos nos esquemas TN a partir do uso de dispositivos DR. Este dispositivo é estabelecido para casos específicos e caracterizado como proteção adicional, assim como a equipotencialização suplementar, conforme apresentado no item 2.1.1.3

2.1.1.3 Proteção adicional contra choques elétricos

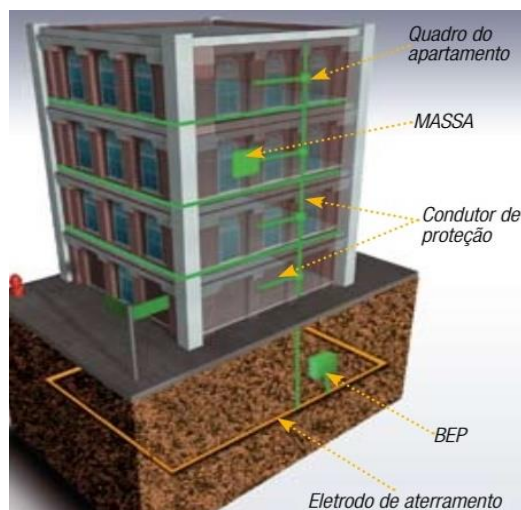
De acordo com ABNT NBR 5410 (2008), proteção adicional é o

meio destinado a garantir a proteção contra choques elétricos em situações de maior risco de perda ou anulação das medidas normalmente aplicáveis, de dificuldade no atendimento pleno das condições de segurança associadas a determinada medida de proteção e/ou, ainda, em situações ou locais em que os perigos do choque elétrico são particularmente graves... São exemplos de proteção adicional contra choques elétricos a realização de equipotencializações suplementares e o uso de proteção diferencial-residual de alta sensibilidade...

A equipotencialização suplementar deve abranger todos os elementos condutivos simultaneamente acessíveis, sejam massas de equipamentos fixos, sejam elementos condutivos da edificação ou de suas utilidades, incluindo as armaduras do concreto armado. A essa equipotencialização devem ser conectados os condutores de proteção de todos os equipamentos, incluindo os condutores de proteção das tomadas de corrente.

A Figura 29 apresenta a ilustração de proteção adicional considerando o Barramento de Equipotencialização Local (BEL). Observa-se que no subsolo do prédio está instalado o BEP (Barramento de Equipotencialização Principal), de onde deriva-se o condutor de proteção interligando o BEL de cada andar. As massas dos equipamentos e estruturas metálicas, por sua vez, são conectadas ao barramento ao BEP e BEL formando subsistemas interligados.

Figura 29 – Caracterização de uma instalação com barramento de equipotencialização principal e local



Fonte: Moreno (2016)

De acordo com Cotrim (2009), a equipotencialização suplementar e o dispositivo diferencial residual, ou seja, a proteção adicional,

não é reconhecida pela NBR 5410 como constituindo em si uma medida de proteção completa e não dispensa, de maneira alguma, o emprego de medidas de proteção completa ou parcial, conforme o caso. Seu objetivo é assegurar uma proteção contra contatos diretos, no caso de falha das medidas aplicadas ou de descuido ou imprudência dos usuários.

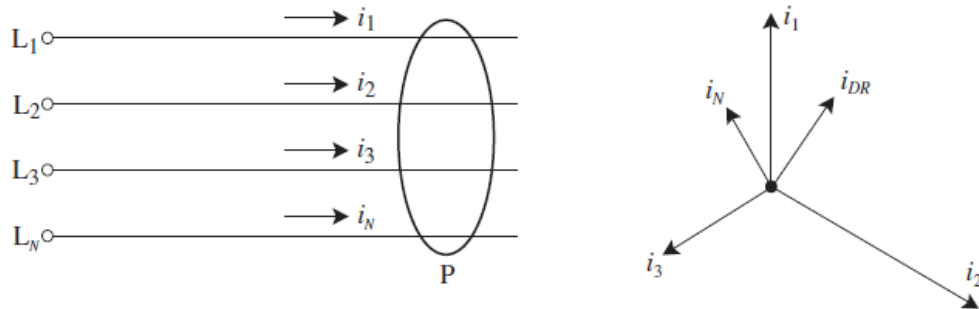
Cotrim (2009) ainda diferencia sobrecorrente e corrente de curto-circuito como: sobrecorrente é uma corrente que excede o valor nominal, que, no caso de condutores elétricos, é a capacidade de condução de corrente (para a condição e temperatura de instalação) – podem ser de dois tipos: corrente de falta, que flui de um condutor para outro ou de um condutor para a terra; e corrente de sobrecarga, sobrecorrente em um circuito ou equipamento elétrico sem que haja falta elétrica.

A corrente de curto-circuito é um caso particular de corrente de falta, é a sobrecorrente resultante de uma falta direta entre condutores energizados que apresentam uma diferença de potencial em funcionamento normal.

A corrente de fuga é, por sua vez, a corrente de pequena intensidade que percorre um caminho diferente do previsto. Em particular, a corrente de fuga de uma instalação ou de parte dela é a corrente que, na ausência de falta, flui através do dielétrico do material isolante dos condutores. A corrente diferencial-residual (IDR) de uma instalação, ou de um setor de uma

instalação, é definida como a soma dos valores instantâneos das correntes que percorrem todos os condutores vivos do circuito em um dado ponto ($IDR = I_1 + I_2 + I_3 + I_N$), Figura 30.

Figura 30 – Representação da corrente vetorial diferencial residencial



Fonte: Cotrim (2009).

De acordo com Souza; Moreno (2001), os dispositivos DR se mantêm ligado enquanto não há corrente de fuga no circuito. A atuação do DR ocorre quando, em uma falha de isolamento no condutor, ou equipamento alimentado por este circuito, surge uma corrente de fuga. Mais especificamente para este estudo, quando uma pessoa toca na parte viva do circuito, ou a massa se tornou viva durante a falha, e a corrente de choque elétrico passa através de seu corpo – a porção de corrente que circula pelo seu corpo (e outros caminhos em paralelo, conforme o caso) provoca um desequilíbrio na soma vetorial das correntes que, atingindo sua sensibilidade, ativa o relé e desarma o dispositivo (Figura 31).

Figura 31 – Vista em corte de um interruptor diferencial residual tetrapolar



Fonte: Eletricidade Moderna (2001).

De acordo com ABNT NBR 5410 (2008), o DR de alta sensibilidade, com corrente diferencial-residual nominal $I_{\Delta n}$ igual ou inferior a 30 mA é obrigatório nas seguintes condições:

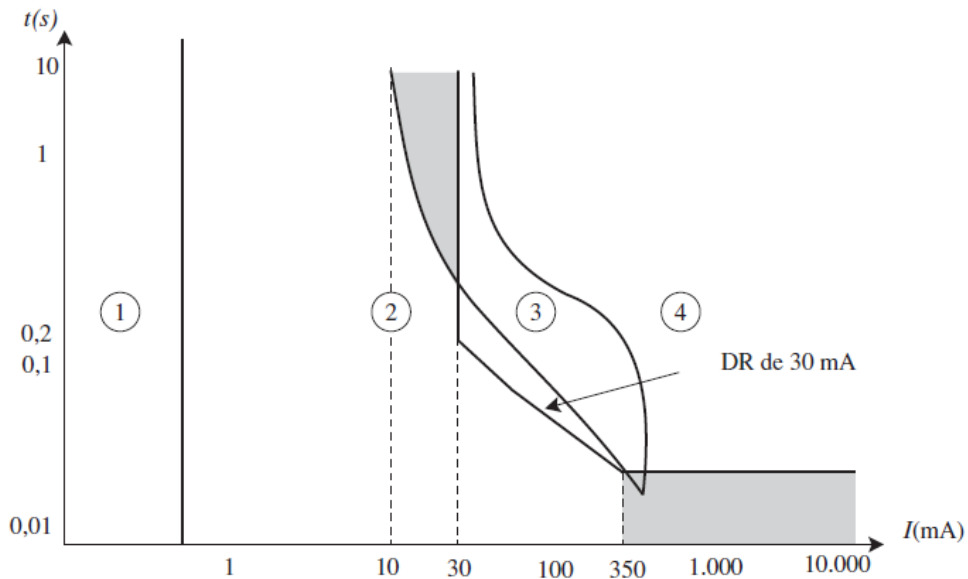
- a) os circuitos que sirvam a pontos de utilização situados em locais contendo banheira ou chuveiro;
- b) os circuitos que alimentem tomadas de corrente situadas em áreas externas à edificação;
- c) os circuitos de tomadas de corrente situadas em áreas internas que possam vir a alimentar equipamentos no exterior;
- d) os circuitos que, em locais de habitação, sirvam a pontos de utilização situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e demais dependências internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens;
- e) os circuitos que, em edificações não-residenciais, sirvam a pontos de tomada situados em cozinhas, copas-cozinhas, lavanderias, áreas de serviço, garagens e, no geral, em áreas internas molhadas em uso normal ou sujeitas a lavagens.

Cotrim (2009) observa que a maior parte dos acidentes de origem elétrica é devida a contatos diretos, resultantes de falta de manutenção, de negligência ou de imprudência dos usuários.

como exemplo, são comuns os acidentes em que há o contato com um condutor “descascado” de um cabo multipolar flexível que alimenta um aparelho portátil, como, uma enceradeira ou um ferro de passar roupa, ou a introdução, por uma criança, de um grampo ou de um clipe em um dos orifícios de uma tomada de corrente. As medidas de proteção contra contatos diretos prescritas pela NBR 5410 são passivas, relacionadas principalmente com disposições de ordem construtiva. Entretanto, por melhor executadas que sejam, tais medidas têm sua eficácia comprometida com o passar do tempo, pelo uso do componente, pelo envelhecimento dos materiais etc. Nessas condições, fica bastante evidente a necessidade de proteção adicional contra contatos diretos, proporcionada pelos dispositivos DR de alta sensibilidade,

O gráfico apresentado na Figura 32 correlaciona os efeitos fisiológicos das correntes e tempos, apresentados na Figura 27, à característica de desarme do dispositivo DR de 30 mA, que, de acordo com Cotrim (2009), ainda poderão atuar a partir de 50% de $I_{\Delta n}$ da sua corrente de residual.

Figura 32 – Atuação de um dispositivo DR de 30 mA na proteção contra contatos diretos



Fonte: Cotrim (2009).

Na análise da atuação do DR, a partir da Figura 32, observa-se que, considerando os tempos máximos de atuação, de acordo com Cotrim (2009),

o dispositivo oferece proteção entre 30 e 350 mA. Para correntes inferiores a 30 mA, ele pode não atuar, e, para correntes superiores a 350 mA, ele pode não atuar em um tempo considerado como suficiente; no primeiro caso, com correntes entre 10 e 30 mA, a abertura ocorre na zona 3, onde os efeitos são reversíveis, e para correntes menores dentro zona 2, onde os efeitos não são danosos; no segundo caso, existe o perigo de fibrilação ventricular... Assim, podemos concluir que um DR de 30 mA é uma boa proteção contra contatos diretos,...

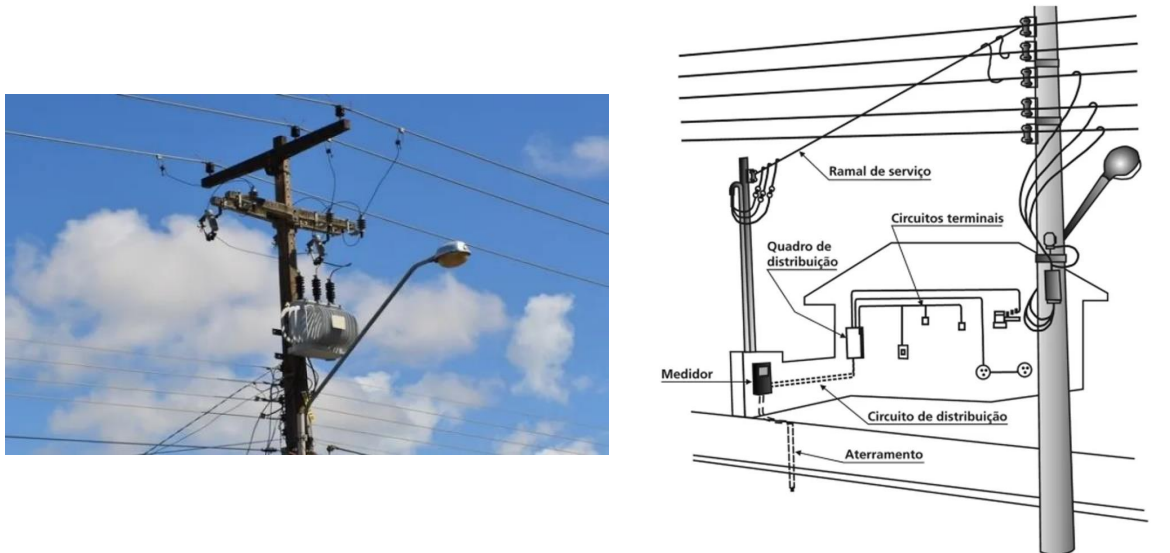
Deve-se observar, ainda, que os DRs não protegem contra contatos diretos entre dois condutores de fases diferentes, pertencentes ao mesmo circuito. Aliás, não existe atualmente nenhum dispositivo que proteja nessa situação. Felizmente, os casos de contato de uma pessoa com duas fases de um circuito são muito raros e, quando ocorrem, normalmente se completam com um terceiro contato com um elemento no potencial da terra, por exemplo, o piso, o que garante a atuação do DR.

3 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE E TENSÃO DE CHOQUE ELÉTRICO

A partir da conclusão de Cotrim (2009) a respeito do uso da proteção supletiva relativa ao contato indireto – podem ser utilizados, mas com restrições – este Capítulo desenvolverá a metodologia para exemplificar tal situação. Tal método será aplicado em nove casos genéricos didaticamente escolhidos e, posteriormente, em três casos específicos e reais, considerando a diversidades de situações encontradas nas residências brasileiras.

A partir da Seção 2.1.1.2, que apresenta a proteção supletiva, e as Figuras 33 a 35, neste Capítulo será retomado, detalhado e equacionado o cálculo da corrente de choque elétrico.

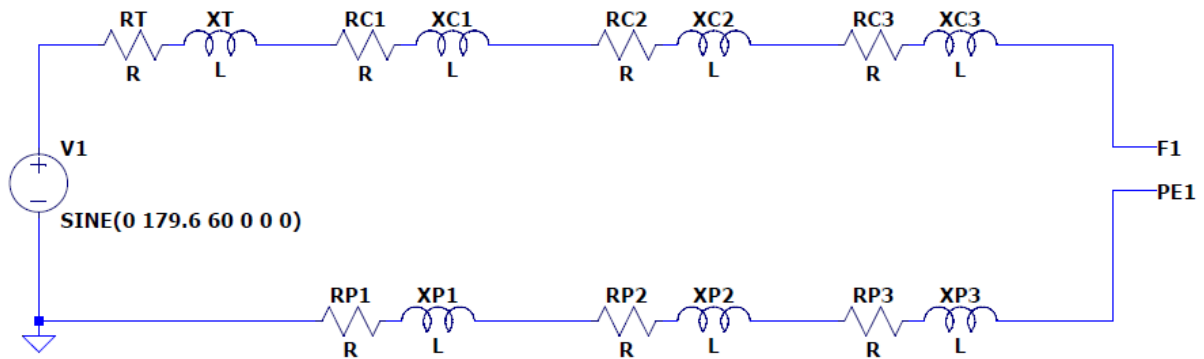
Figura 33 – Caracterização do sistema: transformador ao circuito terminal



Fonte: José Alexandre (2019) e Engenharia 360 (2022).

Considerando a alimentação primária como fonte ideal, a primeira impedância consiste-se na resistência e reatância do transformador (Z_T), seguindo-se pelos cabos da rede secundária de distribuição até o ponto de derivação (Z_{C1}), o ramal de serviço e o circuito de distribuição até o quadro (Z_{C2}) e, finalizando com o circuito terminal (Z_{C3}). Para a análise do choque elétrico, será necessário considerar o circuito de retorno da corrente até o transformador, e sua impedância será indicada como dos condutores de proteção: (Z_{P1}), (Z_{P2}) e (Z_{P3}). Os pontos de conexão da tomada estão indicados como F1 e PE1 para a fase 1 e o terminal de aterramento respectivamente, resultando no circuito da Figura 34.

Figura 34 – Circuito equivalente inicial do sistema analisado



Fonte: Desenvolvido pela autora

Considere, ainda, que tratando-se de um circuito TN-C-S, Z_{P3} é o condutor de proteção, enquanto Z_{P1} e Z_{P2} , o condutor neutro da instalação, responsável pelo retorno da corrente até o transformador. Nesta análise considera-se que o circuito se fecha através do transformador, onde também está o aterramento.

O circuito inicia-se pelo transformador da concessionária de energia elétrica (ENERGISA-MS), cuja impedância deve ser determinada. A partir das características do transformador fornecido pelo fabricante, é possível se obter a impedância, a resistência e a reatância. De acordo como Fergütz (2016), a impedância do transformador pode ser obtida a partir da impedância percentual, da sua tensão nominal e da sua potência aparente, conforme a Equação 2. A impedâncias percentuais típicas de transformadores são apresentadas no Anexo D.

$$Z_T = Z_{\%} \frac{(V_n)^2}{S_n * 100} \quad (2)$$

Onde:

- Z_T – impedância do transformador [Ω];
- $Z_{\%}$ – impedância percentual do transformador [%];
- V_n – tensão nominal secundária de linha [V];
- S_n – potência nominal do transformador [VA].

Ainda é necessário separar a resistência da reatância para a utilização no circuito equivalente apresentado na Figura 34 (R_T e X_T). Ainda segundo Fergütz (2016), encontra-se a resistência percentual a partir da perda no cobre, para, então, obter-se a resistência (R_T) conforme as Equações 3 e 4.

$$R_{\%} = \frac{P_w}{S_n} * 100 \quad (3)$$

$$R_T = R_{\%} \frac{(V_n)^2}{S_n * 100} \quad (4)$$

Onde:

- $R_{\%}$ – resistência percentual do transformador [%];
- P_w – potência de perda no cobre do transformador (Anexo D) [W].
- S_n – potência nominal do transformador [VA].
- V_n – tensão nominal secundária de linha [V];
- R_T – resistência equivalente do cobre do transformador [Ω];

Por fim, encontra-se a reatância do número complexo pelo Teorema de Pitágoras, Equação 5.

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (5)$$

Onde:

- X_T – resistência percentual do transformador [Ω];
- Z_T – impedância do transformador [Ω];
- R_T – resistência equivalente do cobre do transformador [Ω];

Após a determinação da impedância do transformador, se faz necessário a obtenção da resistência dos condutores de cada trecho analisado. Observa-se que os três trechos dos condutores fase, bem como os seus respectivos condutores de proteção, são calculados utilizando a mesma metodologia.

Para a análise da corrente que fluirá em um circuito terminal de um consumidor ligado a um transformador, os valores de resistência e reatância considerados são de sequência positiva. Assim, a resistência e a reatância de cada trecho do circuito representado na Figura 28 são determinadas considerando-se suas resistências e reatância por unidade de comprimento para a seção utilizada (disponível no Anexo E). Usa-se, então, as Equações 6 e 7.

$$R_{C1} = r_{C1} * L_{C1} \quad (6)$$

$$X_{C1} = x_{C1} * L_{C1} \quad (7)$$

Onde:

- R_{C1} – resistência do condutor do trecho 1 [Ω];
- r_{C1} – resistência por unidade de comprimento [Ω/m];
- X_{C1} – reatância do condutor do trecho 1 [Ω];
- x_{C1} – reatância por unidade de comprimento [Ω/m];
- L_{C1} – comprimento do circuito [m];

A próxima etapa necessária para a determinação da corrente de choque elétrico consiste na inserção do equipamento cujo defeito leva a energização de sua carcaça metálica. Tal situação pode, ainda, consistir-se em uma falha que leve a conexão direta a carcaça – resultando em uma resistência igual a zero Ohm ou, ligar-se através de partes resistivas do equipamento. Para esta última condição de falha, a resistência pode variar desde frações até milhares de Ohms, necessitando, ao fim, o cálculo das diversas possibilidades para a verificação da eficácia da proteção supletiva.

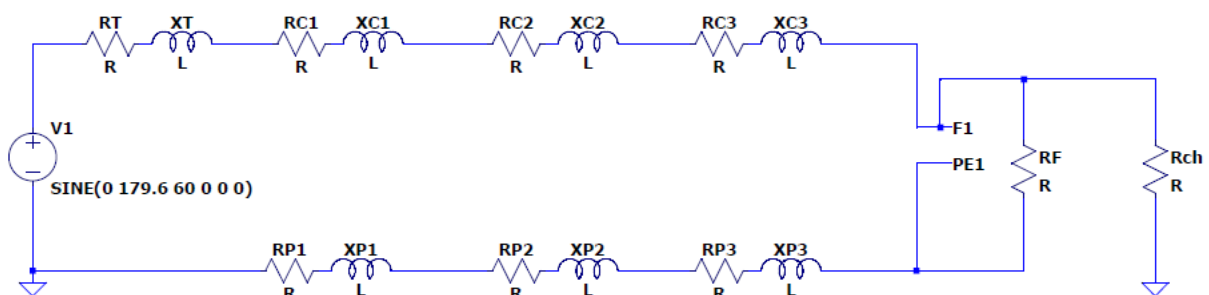
Finaliza-se o circuito considerando a resistência estimada do corpo humano para os casos mais críticos. A referência da resistência do corpo humano a ser utilizada no circuito equivalente adotada neste trabalho é proposta por Cotrim (2009):

A resistência (ou a impedância) do corpo não é constante, pois varia de pessoa para pessoa e também na mesma pessoa, de acordo com as condições fisiológicas e ambientais. As principais variáveis que influem no valor da resistência elétrica do corpo humano são:

- Estado da pele...
- Local de contato...
- Área de contato...
- Pressão de contato...
- Natureza da corrente...
- Taxa de álcool no sangue...
- Tensão elétrica do choque...

Dentre as diversas variáveis que interferem na resistência do corpo humano, considerando ainda o seu contato, de acordo com Cotrim (2009), como situação desfavorável, a resistência de 1250Ω que, na presença de água reduz para 70% e em soluções condutoras 50% – podendo chegar a 625Ω para 5% da população para uma tensão de contato de 125 V. A partir da Figura 34 foi inserido a resistência da falha (R_F) e a resistência do corpo humano (R_{CH}), resultando na Figura 35.

Figura 35 – Circuito equivalente com resistência de falha e de choque



Fonte: Desenvolvido pela autora

3.1 CÁLCULO DA CORRENTE, TEMPO E TENSÃO DE CHOQUE ELÉTRICO

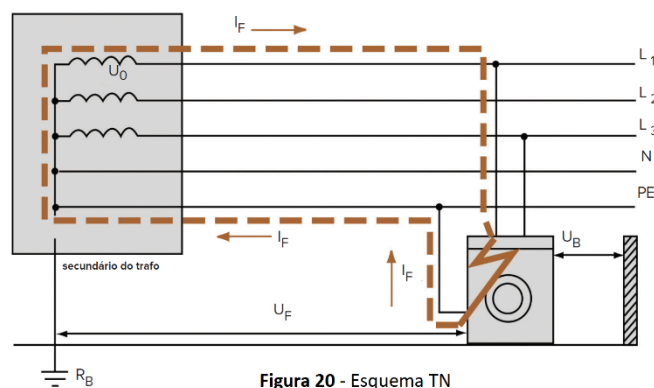
Para a estimativa do risco de choque elétrico em uma residência, foi considerado um modelo de estudo conforme apresentado nas Figuras 36 e 37. A Figura 37 apresenta uma máquina de lavar roupa, sobretudo, pode ser generalizado para qualquer equipamento com falha para a massa (estrutura condutora), em especial instalados em ambientes normalmente molhados como áreas de lavar, ou eventualmente molhados (durante a limpeza) como cozinhas, copas cozinhas, áreas gourmet etc.

Figura 36 – Máquina de lavar roupa com falha para massa: tensão na carcaça



Fonte: Refrimaq (2019).

Figura 37 – Circuito da corrente de falha de uma máquina de lavar roupa



Fonte: Aletmetec Elétrica (2019).

A generalização das possibilidades, abordadas neste trabalho, será apresentada através de 9 combinações possíveis de sete variáveis: tensão de alimentação do equipamento, seção do

ramal de serviço e circuito de distribuição até o quadro, disjuntor termomagnético de proteção, curva de desarme do disjuntor, resistência de falta, existência de dispositivo DR e Aterramento.

Assim, as condições dos modelos visam contemplar moradias alimentadas por sistemas 380/220 V e 220/127 V, considerando, então, tensão fase e neutro para a alimentação da máquina de lavar roupa monofásica em 220 V e 127 V, ou opcionalmente, bifásica, 220 V para o segundo caso – generalizando, assim, para todas as tensões padronizadas residenciais disponíveis no Brasil; sobretudo, o circuito analisado, sempre será de fase para neutro.

A seção do ramal de serviço e circuito até o quadro de distribuição será considerada como um único elemento e poderá ser de 6,0 mm² e 10,0 mm². O disjuntor termomagnético considerado apresenta-se em três condições: inexistência de quadro de distribuição e ramal 6,0 mm² – 30 A instalado no padrão de entrada e medição de energia; inexistência de quadro de distribuição e ramal 10,0 mm² – 40 A instalado no padrão de entrada e medição de energia; existência de disjuntor de 20 A instalado no quadro de distribuição e, por fim, circuito terminal de 2,5 mm². As curvas de desarme (B e C), por sua vez, foram convenientemente variadas para verificar o comportamento da proteção destes componentes. Por fim, o modelo contempla a utilização do dispositivo de corrente diferencial residual e a existência de aterramento.

O Quadro 3 sistematiza a combinação proposta considerando, ainda, as condições que permanecem constantes ao longo do cálculo da corrente, tempo e tensão de choque: potência do transformador e seções da rede de distribuição, seção do circuito terminal, comprimento dos condutores e tipo do ambiente do equipamento.

Quadro 3 – Características e configuração dos nove modelos simulados de alimentação de moradia

Casos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tensão fase e neutro U ₀ (V)	220	127	220	127	220	127	127	127	220
Ramal de entrada (mm ²)	6	10	6	10	6	10	10	10	6
Disjuntor de proteção (A)	30	40	30	40	20	20	20	20	20
Curva do disjuntor	C	C	C	C	B ou C	C	B	B	B ou C
Dispositivo Diferencial Residual	não	não	não	não	não	não	não	não	sim
Aterramento	não	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Resistência de falta (Ω)	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ambiente Anexo B	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3

Nota: Considerou-se alimentação por transformador de 75 kVA, rede aérea em 3x1x70+70 mm² com 220 m, ramal de ligação, entrada e alimentador com 40 m e circuito terminal em 2,5 mm² com 20 m.

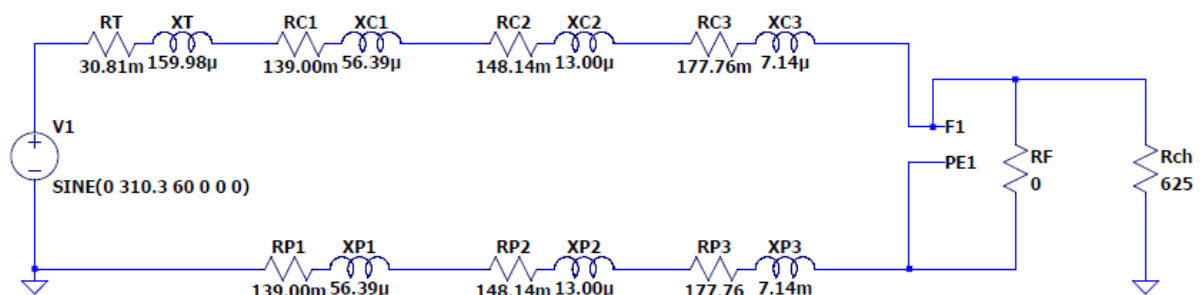
Fonte: Elaborado pela autora

Visando contemplar situações críticas, foram utilizados circuitos longos – alimentados por um transformador de 75 kVA – com rede aérea de 220 m e seção do condutor dimensionado conforme NDU 006 – Critérios Básicos para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas (ENERGISA: NDU006, 2022), o ramal de serviço juntamente com o circuito de distribuição que alimentador do quadro de distribuição (40 m) e, por último, o circuito terminal que alimenta a máquina de lavar roupa em 2,5 mm² (20 m). De igual forma foi considerado o caminho de retorno da corrente até o transformador – para os casos em que existem.

3.1.1 Casos 01 e 02: Tensões 220 V e 127 V sem aterramento, quadro e DR

O circuito equivalente para o cálculo da corrente e tensão de choque elétrico para o Caso 01 é mostrado na Figura 38. O circuito foi simulado no aplicativo LTSpice (ANALOG DIVICES, 2022), considerando, ainda, o uso do suplemento e exemplo para Excel desenvolvido por Hafner (2020) para cálculo de corrente de curto-circuito tratado em Mamede filho (2017).

Figura 38 – Circuito equivalente do Caso 01: tensão 220 V sem aterramento, quadro e DR



Fonte: Desenvolvido pela autora

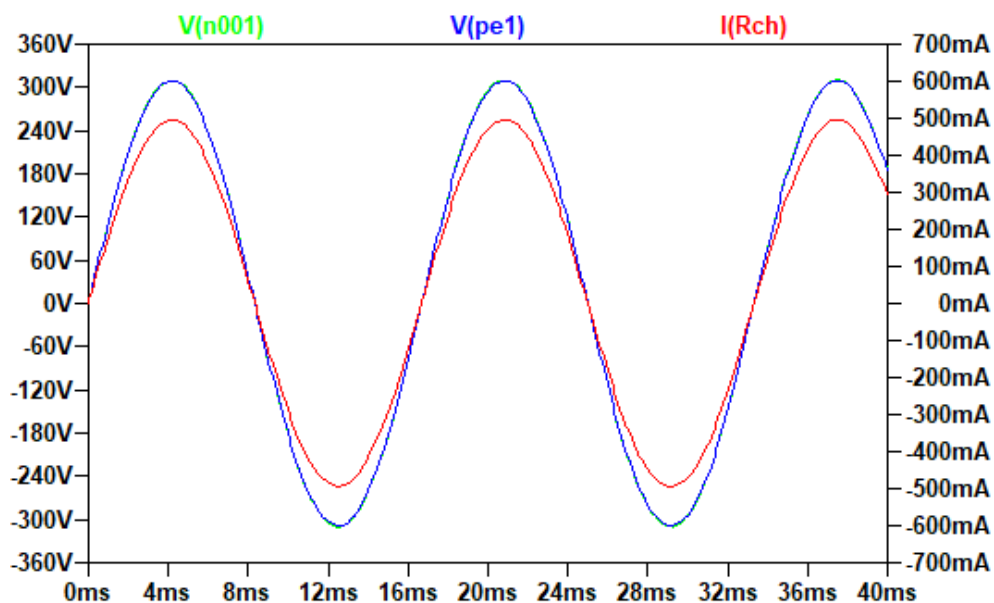
Observa-se, então, que a fonte senoidal inserida no LTSpice recebe o valor de sua amplitude, de forma que, a tensão eficaz de 220 V multiplicado pela raiz de 2 é igual a 310,3 V. A impedância do transformador de 75 kVA foi calculada considerando as Equações 2 a 5 e o Anexo D, onde é possível obter seu valor percentual e a perda no cobre.

As resistências e reatâncias dos cabos foram obtidas utilizando-se as Equações 6 e 7 e os Anexos E e F. Enquanto a rede de distribuição possui 220 m de cabo multiplexado de alumínio com 3x1x70+70 XLPE 06/1 kV 90°, considerou-se 40 m para o ramal de serviço até o quadro de distribuição com o cabo 6 mm², e o circuito terminal, 20 m em 2,5 mm², ambos em cobre isolamento 750V, 70°. Assim foram obtidas as resistências e reatâncias dos condutores 1 a

3 para a fase e proteção, considerando, ainda, que a entrada do dado no LTSpice é realizada em indutância (L, dada em H, uma vez que $X_L = 2 \cdot \pi \cdot \text{frequência} \cdot \text{indutância}$).

Considerando, por fim, que o Caso 1 não possui aterramento e, desta forma o ramo de retorno (proteção), optou-se por multiplicar a resistência e reatância do cabo do circuito terminal por 1.000 para manter o arranjo do circuito. Destaca, ainda, que a resistência da falta é igual a zero e, do corpo humano, 625Ω , como já apresentado. O resultado pode ser verificado na Figura 39.

Figura 39 – Tensão da fonte, de contato e corrente de choque para o Caso 01



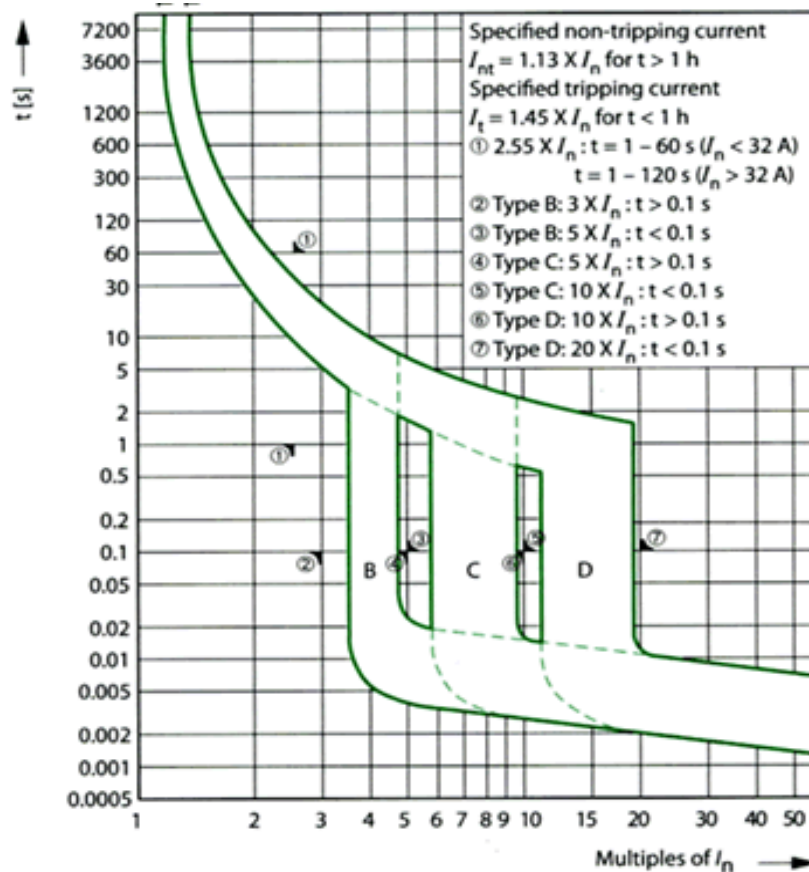
Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

Observa-se no gráfico da Figura 39 que a corrente de pico de choque elétrico (passando por R_{CH}) é igual a 495 mA que dividida por raiz de 2 é igual 350 mA. Esta corrente é elevada para o corpo humano, mas de pequena intensidade para produzir queda de tensão no circuito de alimentação até o equipamento em estudo, de forma que a tensão V_{PE1} (igual a V_{F1} uma vez que $R_F = 0 \Omega$) é igual a tensão da fonte (V_{n001}) e, assim, fica sobreposta por esta. Por fim, a tensão V_{F1} é também a tensão de contato que, através da resistência de 625Ω , provoca a corrente de choque apresentada (350 mA)

O próximo passo consiste na verificação do tempo do choque, associado ao desarme do disjuntor termomagnético empregado na proteção supletiva. Este passo se dá pela análise das curvas de desarmes disponíveis na Figura 40. Do gráfico observa-se que os disjuntores definidos pela norma NBR NM 60898/2004 – Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para

instalações domésticas e similares, tem sua não atuação para até 1,13 In, enquanto devem desarmar até 1,45 In.

Figura 40 – Gráfico da curva de desarme dos disjuntores.

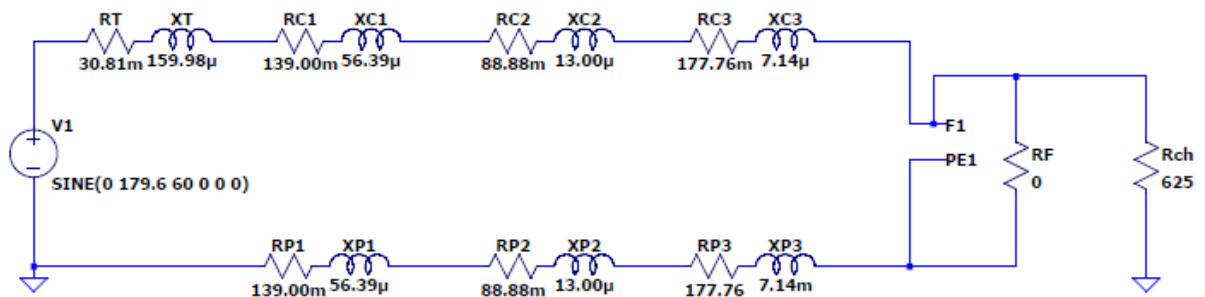


Fonte: CT Services Soluções em Automação (2018).

Assim, de acordo com a Figura 40, o disjuntor 30 A poderia desarmar até 43,5 A, enquanto a corrente de choque de 0,35 A não provocaria o desligamento do circuito, e o choque permaneceria. Considerando, por fim, a Figura 19, 350 mA passando corpo humano levaria a fibrilação ventricular a partir de 2 segundos, resultando em óbito se o choque não for interrompido.

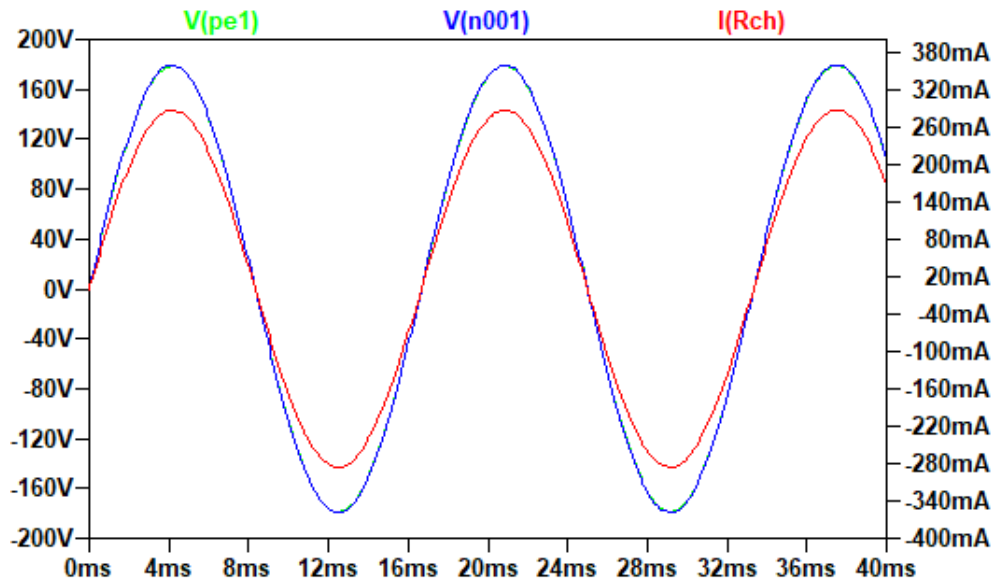
O Caso 2 segue a mesma configuração, alterando-se a tensão de alimentação do equipamento para 127 V, o condutor até o quadro para 10,0 mm² e o disjuntor para 40 A. O circuito é, então, apresentado na Figura 41 e os resultados de corrente de choque e tensão de contato apresentados na Figura 42.

Figura 41 – Circuito equivalente do Caso 02: tensão 127 V sem aterramento, quadro e DR



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

Figura 42 – Tensão da fonte, de contato e corrente de choque para o Caso 02



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

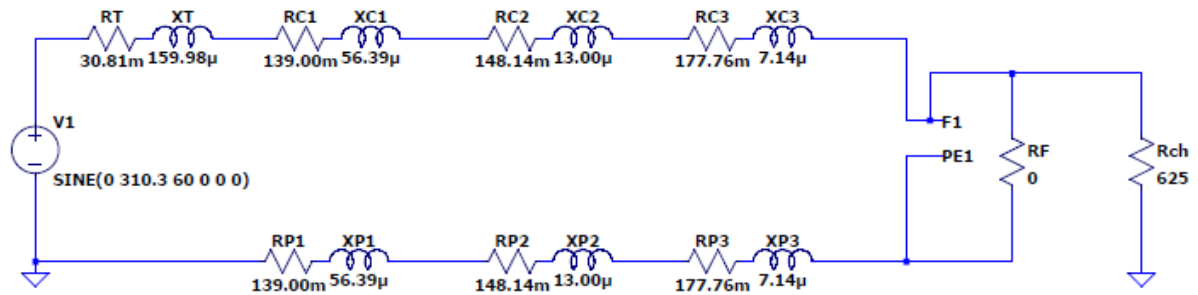
Como resultado a corrente de choque de 0,20 A não provoca o desligamento do circuito, e o choque permanece. Considerando, novamente, a Figura 19, 200 mA passando corpo humano levaria a fibrilação ventricular a partir de 5 segundos, resultando em óbito se o choque não for interrompido.

3.1.2 Casos 03 e 04: Tensões 220 V e 127 V sem quadro e DR e com aterramento

Os Casos 03 e 04 diferem dos 01 e 02 pela existência de um caminho de retorno da corrente de falha definido pelo condutor de proteção até o quadro de distribuição e pelo neutro até o transformador, onde se considera o aterramento. Para esta condição utiliza-se a resistência

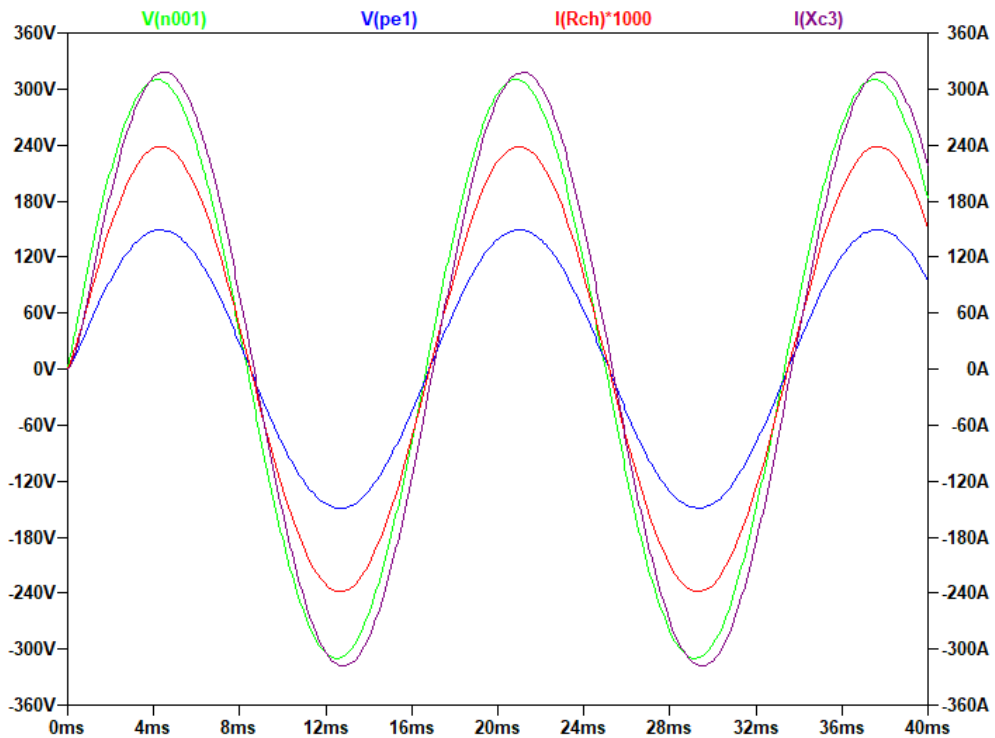
e reatância correta do cabo de proteção (que haviam sido multiplicadas por 1000 nos Casos 01 e 02), resultando nas Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Circuito equivalente do Caso 03: tensão 220 V sem quadro e DR e com aterramento



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

Figura 44 – Tensão da fonte, de contato e corrente de curto e de choque para o Caso 03

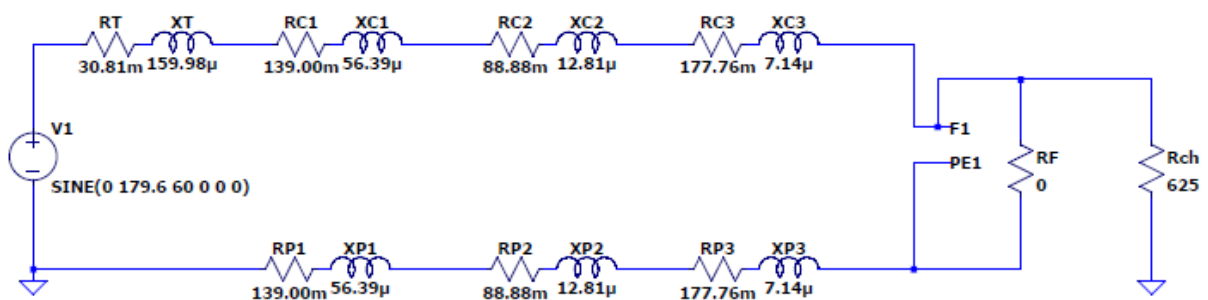


Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

Calculando-se os valores eficazes tem-se uma corrente de curto-circuito igual a 226,7 A, uma tensão de contato de 105,6 V e uma corrente de choque igual a 168,9 mA. O próximo passo é encontrar o tempo de desarme do disjuntor utilizando a Figura 40 – faz-se a

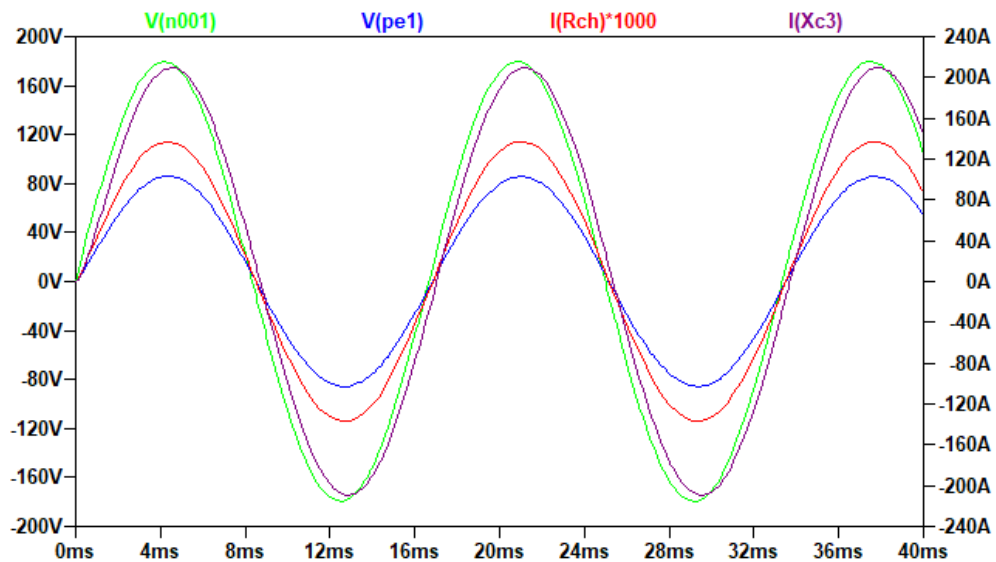
relação da corrente de curto-circuito pela corrente nominal do disjuntor ($226,7/30 = 7,4I_n$) para localizar o ponto no eixo x (em escala logarítmica): a garantia de desarme (linha superior) se dará, para curva C, normalmente utilizada no padrão de entrada de energia, em 4 s. Buscando-se os efeitos da corrente no corpo humano, Figura 19, tem-se fibrilação ventricular em 4 s, concluindo-se que se trata de uma condição que o acidentado já teria morrido quando o disjuntor desarmar. As Figura 45 e 46 referem-se ao Caso 4.

Figura 45 – Circuito equivalente do Caso 04: tensão 127 V sem quadro e DR e com aterramento



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

Figura 46 – Tensão da fonte, de contato e corrente de curto e de choque para o Caso 04



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

Para o Caso 4, onde a tensão é 127 V o cabo do ramal 10,0 mm² e o disjuntor instalado no padrão de entrada é de 40 A, calculando-se os valores eficazes tem-se uma corrente de curto-circuito igual a 154,0 A, uma tensão de contato de 62,6 V e uma corrente de choque igual a

100,1 mA. O tempo de desarme do disjuntor utilizando-se a Figura 40 para $3,8I_n$ é de 9 s. Buscando-se os efeitos da corrente no corpo humano, novamente na Figura 19, tem-se a probabilidade de 50% da fibrilação ventricular, concluindo-se que se trata de uma condição que óbito aconteceria antes do disjuntor do desarmar, como o Caso 3.

3.1.3 Casos 05, 06 e 07: Tensões 220 V e 127 V sem DR e com quadro e aterramento

Os Casos de 01 a 04 abordaram, como elemento principal, a inexistência de aterramento (01 e 02) e a existência de aterramento (03 e 04) enquanto a única proteção é a existente no padrão de entrada de energia – sem quadro de distribuição. O problema para esses casos, tratados aqui, é o fato do dispositivo de proteção ser dimensionado para toda a carga da residência, de forma que, a partir do cabo $6,0 \text{ mm}^2$ ou $10,0 \text{ mm}^2$ derivam-se os circuitos terminais de $2,5 \text{ mm}^2$, por exemplo.

Este trabalho não aborda, ainda, para os Casos anteriores, o efeito da sobrecarga do cabo do circuito terminal, uma vez que a proteção é para o ramal principal. Tal efeito provocaria a queima da isolação, podendo levar ao incêndio da residência.

Como pode ser observado nas seções anteriores, a corrente de curto circuito – especificamente para os Casos 03 e 04 – não é suficiente para acionar o elemento magnético do dispositivo, de forma que, até o aquecimento do bimetálico do disjuntor decorre um tempo superior ao suportado pelo corpo humano para a corrente de choque elétrico. Isso se dá pelo fato da curva C do disjuntor utilizado e a entrada no eixo x de disparo dispositivo se dar pelo múltiplo de sua corrente nominal ($I_{\text{curto}} * I_n$). Os Casos 05 a 07, por sua vez, buscarão esclarecer a questão sobre a influência da existência do quadro de distribuição com a proteção adequada dos circuitos terminais, considerando, ainda, as diferentes curvas de disparo dos disjuntores.

Observa-se, sobretudo, que os Casos nesta seção analisados, mantém a configuração do circuito e correntes exatamente iguais aos Casos 03 e 04, outrossim, verifica-se o efeito de um disjuntor de 20 A nas curvas B e C, para o Caso 05 (220 V), C, Caso 06 (127 V), finalizando o Caso 07 para a curva B (127 V).

Determina-se, então, a partir da corrente de curto-circuito do Caso 03 (226,7 A), o novo valor da relação com a corrente nominal do disjuntor ($226,7/20 = 11,3I_n$) para ser levado ao gráfico da Figura 40. O tempo de desarme, para as curvas B e C, é igual a 20 ms que, levado ao gráfico da Figura 19 para uma corrente de choque igual a 168,9 mA, obtém-se um ponto na Zona 2 - aquela em que a corrente não produz nenhum efeito fisiopatológico perigoso, concluindo-se pela eficácia do disjuntor termomagnético como proteção supletiva.

Os Casos 06 e 07, por sua vez, remetem-se aos resultados do circuito do Caso 04 – corrente de curto-circuito de 154,0 A, corrente de choque de 100,1 mA. A relação com a corrente nominal do disjuntor é dada por $154,0/20 = 7,7I_n$ para ser levado ao gráfico da Figura 40. O tempo de desarme para a curva B é igual a 0,02 s, enquanto, para curva C é 4 s. Levando-se ao gráfico da Figura 19 para uma corrente de choque de 154,0 mA, obtém-se, para o Caso 06, o mesmo ponto na Zona 2 que do Caso 05 definindo que o disjuntor termomagnético é eficaz como proteção supletiva.

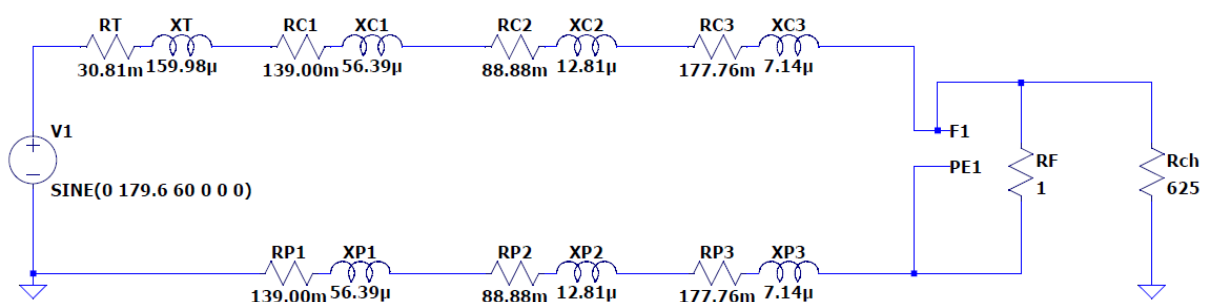
Por outro lado, para o Caso 07, o ponto encontra-se em um ponto mediano da Zona 4, entendendo-se a probabilidade de fibrilação ventricular de 25%, o que levaria a morte antes da atuação do disjuntor. Conclui-se, por fim, que a diferença da proteção supletiva para os Casos 06 e 07 está na curva de desarme do disjuntor – a curva B atua enquanto a C não atua em tempo suficiente para a proteção contra choque elétrico.

3.1.4 Caso 08: Tensão 127 V sem DR e com quadro, aterramento e resistência de falta

Com a finalidade de evitar generalizações inconsistentes para o Caso 06, bem como inserir variáveis reais a abordagem, este modelo considera a existência de uma resistência de falta. Trata-se da consideração de um elemento construtivo do equipamento com resistência diferente de zero inserido no retorno da corrente de fuga.

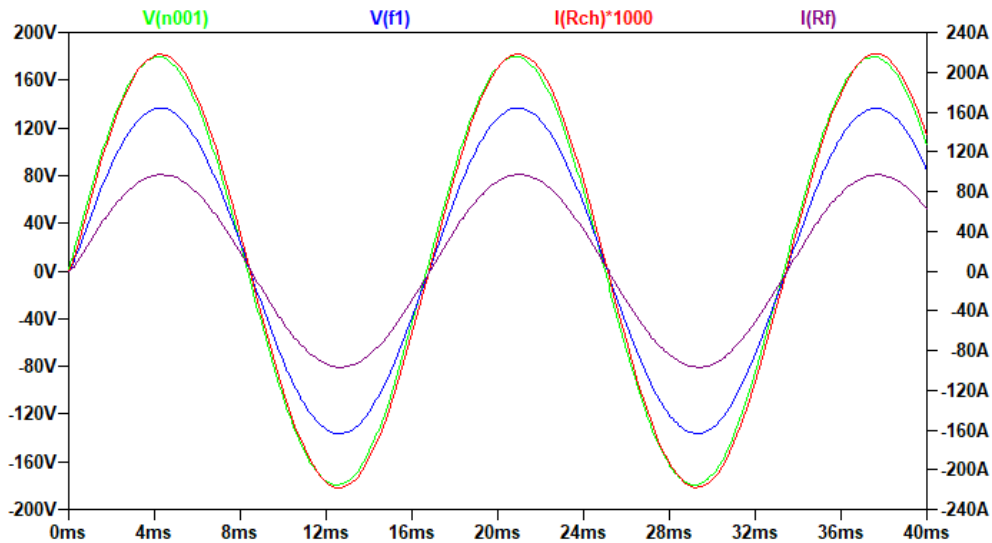
Materiais ferrosos, ou mesmo plásticos carbonizados ou envolvidos por líquidos ou soluções pouco condutivas são exemplos de resistência que irão atuar para a redução da corrente de curto-circuito. Outro ponto relevante é, por exemplo, uma condição em que o contato do elemento energizado com a carcaça se dá ao longo do enrolamento do motor – esta resistência de falta pode chegar até a própria impedância do equipamento. Tal resistência reduz a corrente de curto e, conseqüentemente, aumenta o tempo de desarme do disjuntor. Para a análise será inserida uma resistência de 1Ω em R_F no circuito do Caso 06, conforme Figuras 47 e 48.

Figura 47 – Circuito equivalente do Caso 08: tensão 127 V sem DR e com quadro, aterramento e resistência de falta



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Figura 48 – Tensão da fonte, de contato e corrente de curto e de choque para o Caso 08



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

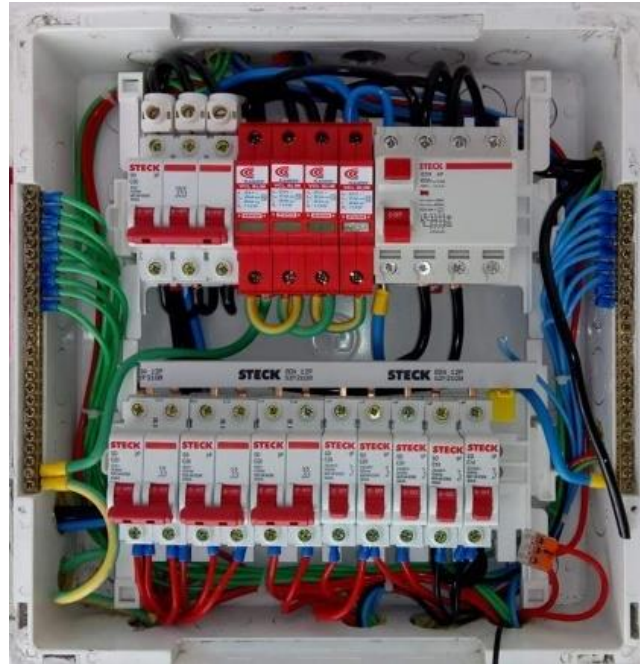
O esperado para o Caso 08, onde a tensão é 127 V o cabo do ramal 10,0 mm² e o disjuntor instalado no padrão de entrada é de 20 A no quadro de distribuição, com o acréscimo da resistência de falta de 1 Ω , é a redução da corrente de curto-circuito. Logo, do valor inicial de 154,0 A passou para 69,7 A, de forma que a nova relação com o disjuntor é $69,7/20 = 3,5I_n$ e o tempo (Figura 40), é igual a 10 s.

Para uma corrente de choque igual a 100,1 mA e um tempo de 10 s, na Figura 19, encontra-se um ponto na Zona 4, que como já observado, provoca fibrilação ventricular e a morte antes do desarme do disjuntor. Assim, conclui-se que, nem mesmo o dispositivo de proteção com curva B é suficiente como proteção supletiva contra choque elétrico.

3.1.5 Caso 09: Tensão 220 V com quadro, aterramento e DR

Este Caso considera a inserção do Dispositivo Diferencial Residual para uma corrente de fuga de 30 mA, adequadamente dimensionado para a corrente do circuito, ou conjunto de circuitos. É oportuno lembrar que o DR atua pela corrente de fuga mesmo que não haja aterramento na instalação. De igual forma, a proteção contra choque elétrico necessita do quadro pois é o local onde será instalado, juntamente com o disjuntor geral e os disjuntores dos circuitos terminais, mas também atuaria sem eles (Figura 49).

Figura 49 – Quadro de distribuição com a instalação de DR de acordo com o Caso 9



Fonte: Projetos Habitissimo (2020).

A análise da curva de atuação do DR é dada pela Figura 32, e discutida em Cotrim (2009). De acordo com Siemens (2022), o fabricante fornece os Dispositivos DR com característica instantânea e com atraso de 10 ms (Tabela 3):

Os Dispositivos DR com característica de disparo Instantâneo e os Dispositivos DR com característica K são utilizados a jusante do Dispositivo DR principal. O Dispositivo seletivo de característica K é fortemente resistente a correntes residuais transitórias na rede e tem seu disparo retardado em 10 ms acima dos valores normais de atuação, o que permite uma seletividade fina....

Tabela 3 – Características de corrente residual nominal e tempo de disparo do Dispositivo DR de fabricação Siemens

A montante		A jusante		
Dispositivo DR Característica S		Dispositivo DR	Instantâneo	Característica K
Corrente residual nominal $I_{\Delta n}$	Tempo de interrupção (até $5 \times I_{\Delta n}$)	Corrente residual nominal	Tempo de interrupção (até $5 \times I_{\Delta n}$)	Tempo de interrupção (até $5 \times I_{\Delta n}$)
100 mA	50 a 150 ms	10 ou 30 mA	≤ 40 ms	20 ... 40 ms
300 mA	50 a 150 ms	10, 30 ou 100 mA	≤ 40 ms	20 ... 40 ms
500 mA	50 a 150 ms	10, 30, 100 mA	≤ 40 ms	20 ... 40 ms
1000 mA	50 a 150 ms	300 mA	≤ 40 ms	20 ... 40 ms

Fonte: SIEMENS (2022).

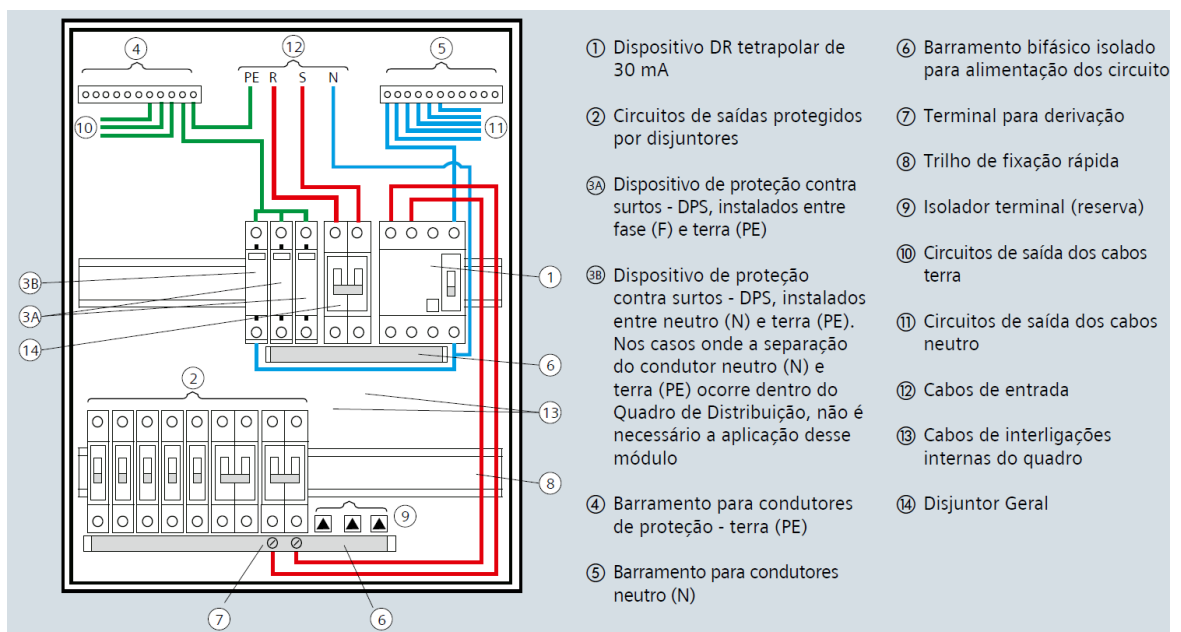
Destaca-se, ainda, que, a instalação a montante, conforme Tabela 3, destina-se a proteção das instalações, e não das pessoas, uma vez que sua menor sensibilidade é de 100 mA e o tempo de 50 ms a 150 ms. Para a instalação a jusante o indicado é com corrente residual nominal de 30 mA, uma vez que o de 10 mA poderá desarmar pelas correntes de fuga normais dos equipamentos. Quando associamos o tempo de 40 ms e a corrente de 30 mA na Figura 19 pode ser visto que se trata da Zona 2, que não produz nenhum efeito fisiopatológico perigoso ao corpo humano. Os dispositivos DR podem ser encontrados para uma fase e neutro ou três fases e um neutro, conforme Tabela 4, e sua montagem pode ser realizada conforme Figura 50.

Tabela 4 – Características de corrente máxima do Dispositivo DR de fabricação Siemens

Dispositivo DR - SIGRES			
Execução	Corrente residual nominal $I_{\Delta n}$	Corrente nominal I_n	TIPO A
			BORNE NEUTRO
			À direita
1P+N (220/127 V AC)	30mA	16A	5SV3 311-6KK12
		25A	5SV3 312-6KK12
		40A	5SV3 314-6KK12
		63A	5SV3 316-6KK12
3P+N (380/220 V AC)	30mA	25A	5SV3 342-6KK12
		40A	5SV3 344-6KK12
		63A	5SV3 346-6KK12
		80A	5SV3 347-6KK12

Fonte: SIEMENS (2022).

Figura 50 – Detalhe da montagem de um Dispositivo DR



Fonte: SIEMENS (2022).

Por fim, conclui-se, assim como definido em ABNT NBR 5410 (2008), que o dispositivo DR é eficaz como proteção complementar. Entende-se, ainda, que, quando a norma define seu uso em ambientes molhados, externos ou que possam alimentar equipamentos utilizados externamente a casa refere-se, de forma geral, a todas os pontos de tomadas de uma residência, haja vista que o uso da água para limpeza é comum no Brasil, assim como extensões ligadas em tomadas de quarto para alimentação de cortadores de grama ou equipamentos de som, dentre outros, com uso externo a casa.

3.1.6 Resumo dos casos modelados

Os nove casos modelados de corrente de choque em moradia estão resumidos no Quadro 4. Relembra-se, aqui, que foram considerados: alimentação por transformador de 75 kVA, rede aérea em $3 \times 1 \times 70 + 70 \text{ mm}^2$ com 220 m, ramal de ligação, entrada e alimentador com 40 m e circuito terminal em $2,5 \text{ mm}^2$ com 20 m. O circuito proposto alimenta um equipamento em área molhada de uma moradia (BB3), a exemplo de uma máquina de lavar roupa.

Considerando o Quadro 4, é possível se obter como observações:

- 1) Os casos mais críticos consistem-se no 1 e 2, pois, devido à ausência de aterramento, uma condição de energização da carcaça da máquina permanecerá com a tensão da rede até que o contato de uma pessoa provoque a corrente de choque levando a óbito;
- 2) A inexistência do quadro de distribuição, com o disjuntor do padrão de entrada de energia sendo o único elemento de proteção, quando se calcula a relação da corrente de curto pela corrente de desarme do dispositivo, tem valores inferiores a $10I_n$. Para esses valores, disjuntores da curva C são acionados pelo dispositivo térmico em tempos superiores a 4 s. Para esse tempo de disparo, correntes acima de 50 mA já podem levar a óbito. Observa-se, então, que para os casos 3 e 4, considerando que a falta aconteça em um instante em que não haja contato, o disjuntor desarma o circuito, o risco de morte se dá pela simultaneidade – contato e falta.

Quadro 4 – Resultados das simulações considerando nove casos de condição de corrente de falta em moradia

Casos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tensão fase e neutro U_0 (V)	220	127	220	127	220	127	127	127	220
Ramal de entrada (mm ²)	6	10	6	10	6	10	10	10	6
Disjuntor de proteção (A)	30	40	30	40	20	20	20	20	20
Curva do disjuntor	C	C	C	C	B ou C	C	B	B	B ou C
Dispositivo Diferencial Residual	não	não	não	não	não	não	não	não	sim
Aterramento	não	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Resistência de falta (Ω)	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ambiente Anexo B	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3	BB3
Impedância do circuito (Ω)	178,6	178,4	0,968	0,825	0,968	0,825	0,825	1,823	0,968
Corrente de Falta (A)	0,350	0,203	226,7	153,9	226,7	153,9	153,9	69,7	226,7
Corrente na curva do disjuntor (xI_n (A))	0,01	0,01	7,56	3,85	11,34	7,70	7,70	3,49	11,34
Tempo de desarme (s)	não desarma	não desarma	4	9	0,02	4	0,02	10	0,04
Impedância do condutor de proteção (Ω)	178,1	178,1	0,466	0,407	0,466	0,407	0,407	1,41	0,466
Tensão de contato U_0 (V)	218,80	126,70	105,60	62,60	105,60	62,60	62,60	97,90	105,60
Impedância do corpo humano (Ω)	625	625	625	625	625	625	625	625	625
Corrente do choque (mA)	350	203	169	100	169	100	100	167	30
Zona de efeito do choque elétrico	5	5	5	4 50% Fibril.	2	4 50% Fibril.	2	5	2
Consequência do choque	Óbito	Óbito	Óbito	Óbito	sem efeito perigoso	Óbito	sem efeito perigoso	Óbito	sem efeito perigoso
Desigualdade $Z_s \cdot I_a \leq U_0$ em 0,2 s	53570 N.A	71370 N.A	290 N.A	330 N.A	193 A.	165 N.A	82 A.	82 A.	193 A.

Nota: Considerou-se alimentação por transformador de 75 kVA, rede aérea em 3x1x70+70 mm² com 220 m, ramal de ligação, entrada e alimentador com 40 m e circuito terminal em 2,5 mm² com 20 m.

Abreviações: N.A. – não atende; A. – Atende; Fibril. – Fibrilação ventricular; Zs – impedância do circuito de falta; I_a – corrente de desarme do disjuntor.

Fonte: Elaborado pela autora

3) Somente os Casos 5 e 7 não apresentam risco de morte para o circuito de choque elétrico simulado uma vez que:

- a) Para o Caso 5 a tensão da rede igual a 220 V propiciou uma maior corrente de curto, elevando o multiplicador da corrente do disjuntor, que, sendo este adequado ao condutor (condição que existe quadro de distribuição e disjuntor de 20 A) resultou em 11,3I_n – assim ao entrar na curva de desarme do disjuntor (Figura 40) encontra a condição de desarme pelo elemento magnético, de forma que é acionado em tempo inferior a 20 ms. Para o tempo obtido, na curva das

zonas de efeito do choque no corpo humano (Figura 19), tem-se a zona 2 (sem efeitos fisiopatológico perigo) até 500 mA, condição em que a corrente de choque elétrico foi igual a 169 mA.

- b) Para o Caso 7, por sua vez, segue o raciocínio do Caso 5, outrossim, trata-se da tensão 127 V onde a corrente de curto circuito é menor. Nesse caso a proteção se dá pela utilização de disjuntor de curva B, com $7,7I_n$, de forma que se encontra tempo de desarme menor que 20 ms o que se obtém a zona 2 – sem efeito perigoso;
- 4) O Caso 8 trata de uma situação real onde há uma resistência de falta diferente de zero. Considerando que o circuito de falta se dê através de materiais ferrosos, plásticos carbonizados, envolvidos em soluções condutivas, ou mesmo pelo enrolamento, o circuito terá sua resistência aumentada e sua corrente de curto-circuito diminuída. A situação apresentada leva o modelo assemelhar-se aos Casos 3 e 4 devida a atuação pelo dispositivo térmico para tempos superiores a 4 s.
- a) Observando o Quadro, em suas duas últimas linhas, verifica-se que a desigualdade definida por ABNT NBR 5410 (2008) que assegura a efetividade da proteção complementar quanto a contatos indiretos por disjuntor termomagnético, encontra-se em desacordo. Uma vez que o método definido pela norma considera o circuito cujas informações estão disponíveis para o cálculo (impedância do transformador e dos cabos), desconsidera a existência da resistência de falta que, por sua vez, pode vir a comprometer os resultados, conforme demonstrado – 82 V é menor que 127 V de forma que atende ao disposto na norma (A.), mas leva a óbito para condição modelada em que existe uma resistência de falta.
- b) Outrossim, ainda que a norma permita o disjuntor termomagnético para proteção contra contato indireto, existe a obrigatoriedade do uso do dispositivo DR para contatos diretos (proteção básica), em especial, nos locais determinados.
- c) Entende-se, ainda, que a aleatoriedade do valor da resistência de falta, seja, também, um dos fatores probabilísticos que influenciam nos casos de óbitos por choque elétrico em moradias.
- 5) O Caso 9, por sua vez, retrata o Caso 3 que, com uma corrente de choque de 169 mA em 4s levaria a óbito. A instalação do dispositivo DR, por sua vez, desliga o circuito para corrente inferior a 30 mA em tempo menor que 40 ms, de forma a garantir a zona 2 do gráfico da Figura 19 – sem efeitos perigosos ao corpo humano.

4 ESTUDO DE CASO DE CHOQUE ELÉTRICO EM MORADIA

Neste Capítulo buscou-se abordar três diferentes instalações residenciais, de forma a cobrir um conjunto de possibilidades normalmente encontradas em situações reais. A primeira não possui quadro de distribuição e, desta forma, inexistente aterramento e o dispositivo DR; a segunda possui a instalação do quadro de distribuição e aterramento, porém ainda não se encontra o dispositivo DR e, a última, trata-se de um projeto de acordo com a ABNT NBR 5410 (2008). Localizadas na cidade de Dourados-MS, as residências foram construídas a 30, 15 e 3 anos, respectivamente.

4.1 ESTUDO DE CASO 01: AUSÊNCIA DE QUADRO, ATERRAMENTO E DR

É comum se encontrar residências, em especial, antigas, ou de construções mais simples, que não possuem quadro de distribuição. Por desconhecimento técnico ou para economia de dinheiro, a instalação é construída com uma rede única – chamada de rede mestre – de onde se derivam todas as ligações, Figura 51.

Figura 51 – Rede de alimentação mestre da residência do Estudo de Caso 01



Fonte: Obtida pela autora (2022).

Observa-se na Figura 51 uma rede mestre formada pela fase e neutro em 10,0 mm² distribuídos para os pontos de tomadas através dos cabos 2,5 mm². Semelhante ao Caso 02 apresentado no Capítulo 3, a residência é alimentada a partir de um transformador de 112,5 kVA na tensão de 127 V (ligação monofásica) (Figura 52) e o circuito terminal analisado

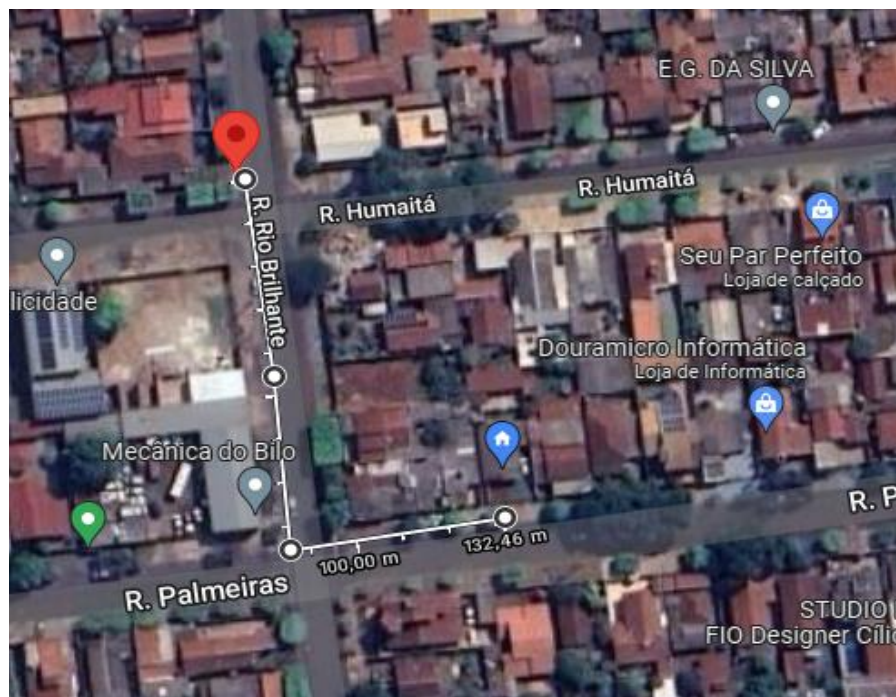
corresponde a máquina de lavar roupa apresentada na Figura 54. A partir da Figura 53 obtém-se a distância de 132 m do transformador até o ponto de ligação.

Figura 52 – Transformador e padrão de entrada do Estudo de Caso 01



Fonte: Obtidas pela autora (2022).

Figura 53 – Localização e distância da rede de distribuição para o Estudo de Caso 01



Fonte: Google Maps (2022).

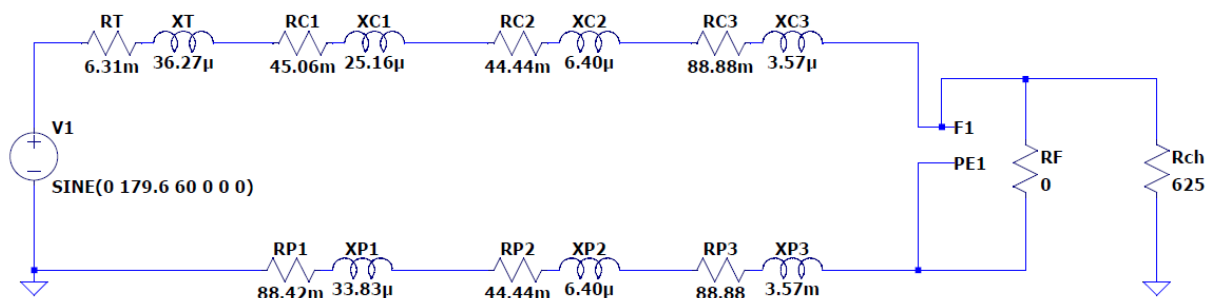
Figura 54 – Máquina de lavar roupa do Estudo de Caso 01



Fonte: Obtido pela autora (2022).

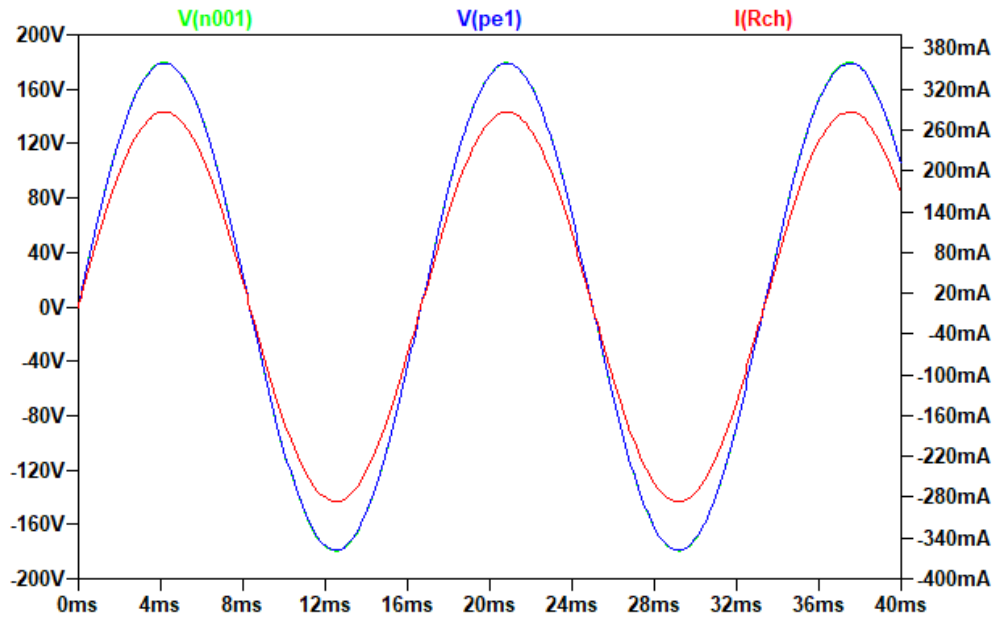
Foram considerados, ainda, a distância de 20 m entre o ponto de derivação da rede da concessionária e o ponto de ligação do circuito terminal. Este último foi definido a distância de 10 m. Por fim, obteve-se o circuito equivalente apresentado na Figura 55 e os resultados, na Figura 56.

Figura 55 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 01: tensão 127 V sem DR, quadro e aterramento



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Figura 56 – Tensão da fonte, de contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 01

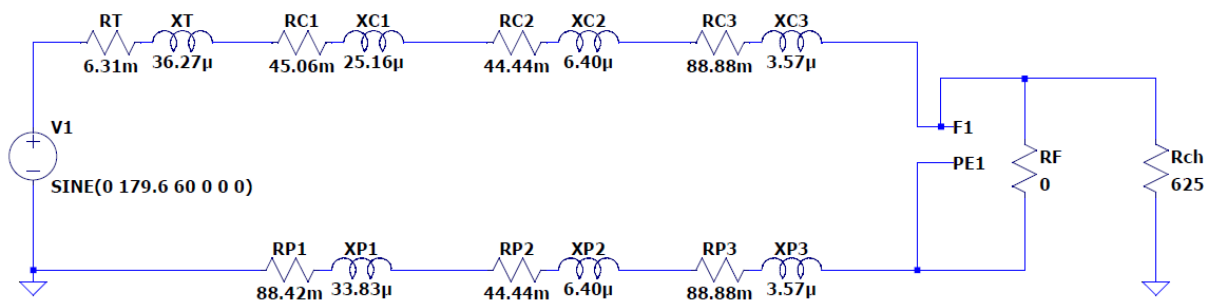


Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Para o Estudo de Caso 01 obteve-se uma corrente de choque igual a 0,20 A e uma tensão de contato de 126,7 V. Como é de se esperar, independentemente das configurações do sistema, prevalece o efeito da resistência do corpo humano considerada (625Ω) e a tensão da rede, de forma que o resultado é igual ao Caso 02 apresentado no Capítulo 3 – considerando a Figura 19, 200 mA passando corpo humano levaria a fibrilação ventricular a partir de 5 segundos, resultando em óbito se o choque não for interrompido.

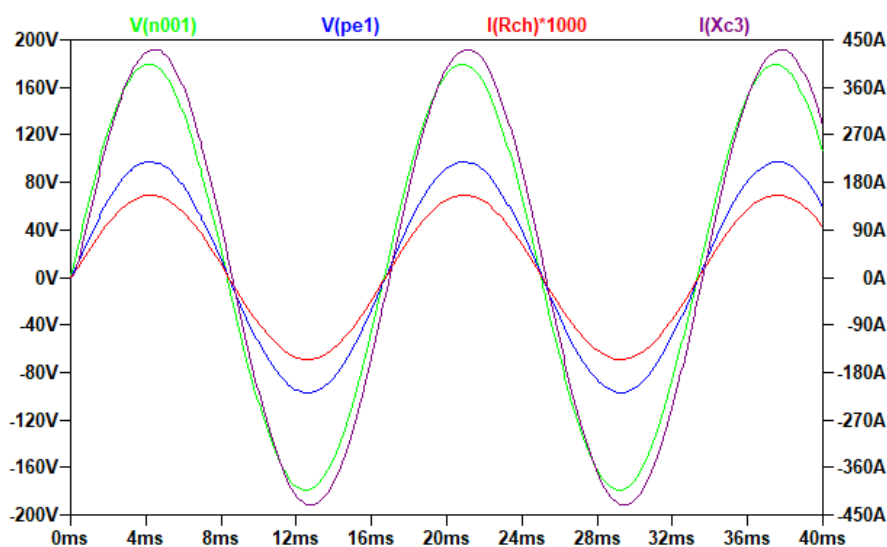
Observa-se, ainda que, considerando que o terminal de aterramento esteja conectado ao neutro da instalação, o que a simulação se assemelharia ao Caso 04. Para esta condição o circuito e os resultados são apresentados nas Figuras 57e 58.

Figura 57 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 01a: tensão 127 V sem DR e quadro e com aterramento



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Figura 58 – Tensão da fonte, contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 01a



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Observe que a resistência e reatância do condutor de proteção definida como infinita (1000 vezes), foram trazidas para os valores reais $R_{P3} = 88,88 \text{ m}\Omega$ e $X_{P3} = 1,35 \text{ m}\Omega$, ou ainda sua indutância $3,57 \text{ }\mu\text{H}$. Assim, tem-se como resultado uma corrente de choque elétrico igual $109,4 \text{ mA}$, tensão de contato de $68,4 \text{ V}$ e uma corrente de curto-circuito igual a $314,6 \text{ A}$, maior que o valor encontrado no Caso 04 que foi de $154,0 \text{ A}$, uma vez o transformador é de maior potência, o cabo da rede de distribuição de maior seção e as distâncias utilizadas são menores.

Agora, para se determinar o tempo de desarme do disjuntor do padrão de entrada de energia tem-se a relação da corrente de curto-circuito pela corrente do dispositivo de proteção: $314,6/40 = 7,9I_n$. Levada à Figura 40, tem-se 4 s que, considerando o efeito no corpo humano, Figura 19, o ponto encontra-se em um ponto mediano da Zona 4, entendendo-se a probabilidade de fibrilação ventricular de 25%, o que levaria a morte antes da atuação do disjuntor.

É importante lembrar que o outro problema associado a esse tipo de instalação consiste-se na falta de proteção contra sobrecarga nos circuitos terminais. Assim, a ligação de um equipamento com potência superior a capacidade de condução de corrente do cabo do circuito terminal levaria ao derretimento da camada de isolamento, a queima desse isolante e, considerando as condições de inflamabilidade do ambiente, ao incêndio da casa.

4.2 ESTUDO DE CASO 02: AUSÊNCIA DE DISPOSITIVO DR

O Estudo de Caso 02 considera uma residência com quadro de distribuição e aterramento nas tomadas, lembrando que a casa possui 15 anos de construção e que, ainda, passou por reforma das suas instalações elétricas, Figura 59.

Figura 59 – Quadro de distribuição do Estudo de Caso 02



Fonte: Obtida pela autora (2022).

A residência também é alimentada a partir de um transformador de 112,5 kVA na tensão de 220/127 V (ligação bifásica) (Figura 60), a entrada de serviço e o circuito de alimentação do cabo é em cabo 16 mm². A partir da Figura 61 obtém-se a distância de 107 m do transformador até o ponto de ligação. O circuito terminal analisado correspondente a máquina de lavar roupa apresentada na Figura 62 está protegido por um disjuntor de 20 A sendo considerado o cabo 2,5 mm².

Figura 60 – Transformador e padrão de entrada do Estudo de Caso 02



Fonte: Obtidas pela autora (2022).

Figura 61 – Localização e distância da rede de distribuição para o Estudo de Caso 02



Fonte: Google Maps (2022).

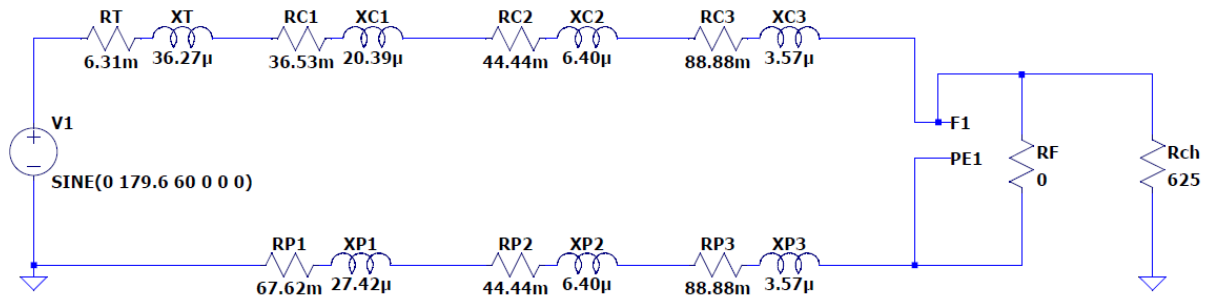
Figura 62 – Máquina de lavar roupa do Estudo de Caso 02



Fonte: Obtido pela autora (2022).

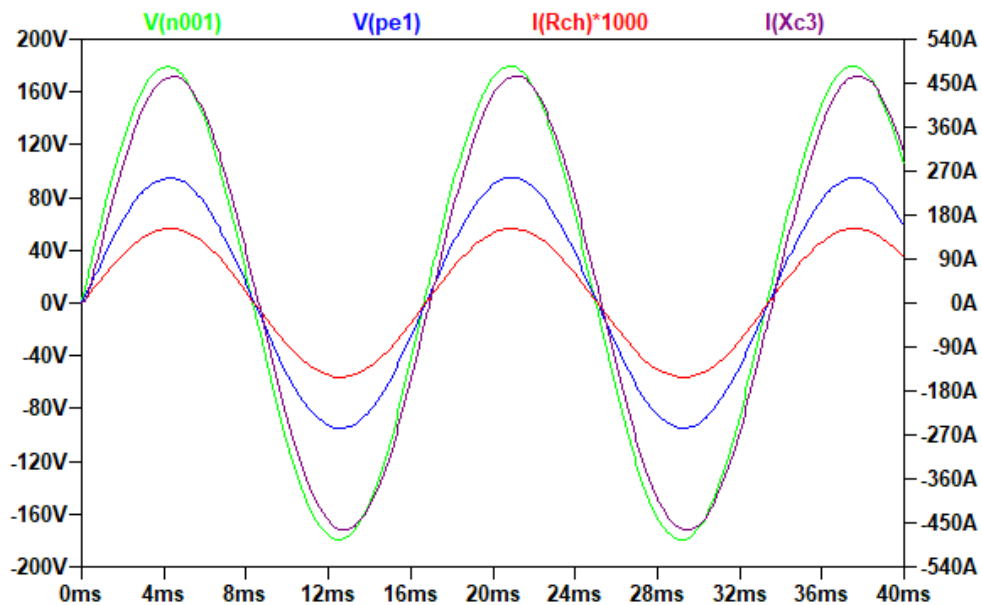
Foram considerados, ainda, a distância de 20 m entre o ponto de derivação da rede da concessionária e o quadro de distribuição e, por fim, 10 m para a ligação do circuito terminal. Assim, obteve-se o circuito equivalente apresentado na Figura 63 e os resultados, na Figura 64.

Figura 63 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 02: tensão 127 V sem Dispositivo DR



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Figura 64 – Tensão da fonte, de contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 02

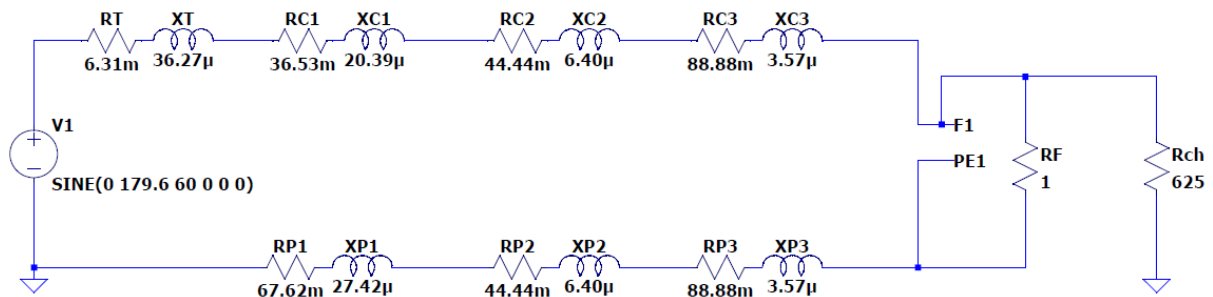


Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Verifica-se, então, para o Estudo de Caso 02 uma corrente de choque elétrico igual 108,0 mA, tensão de contato de 67,5 V e uma corrente de curto-circuito igual a 335,0 A. O tempo de desarme do disjuntor de 20 A no quadro de distribuição, a partir da relação da corrente de curto-circuito pela corrente do dispositivo de proteção: $335,0/20 = 16,7I_n$, levada à Figura 40, tem-se 10 ms que, considerando o efeito no corpo humano, Figura 19, o ponto encontra-se em uma região mediana da Zona 2, onde a corrente não produz nenhum efeito fisiopatológico perigoso.

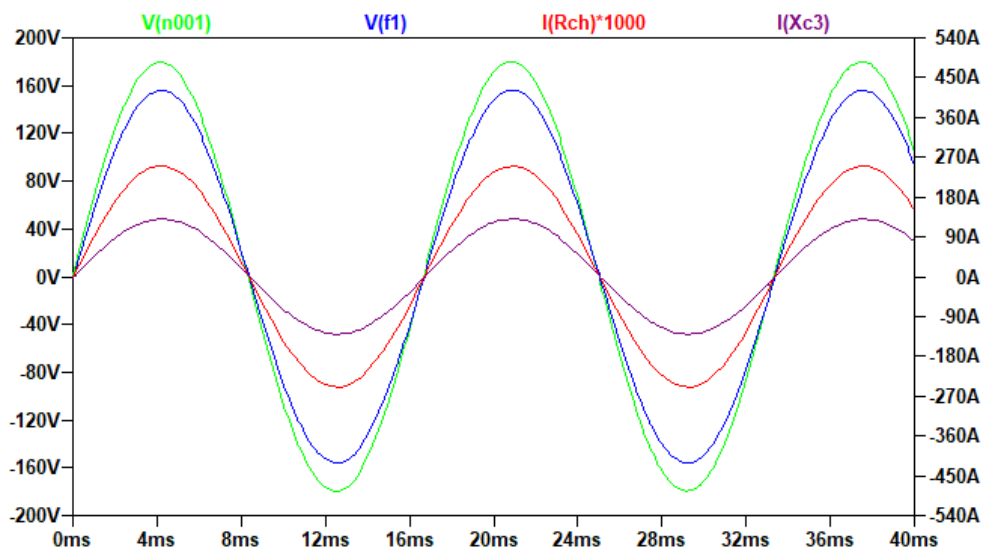
Considerando que uma resistência de 1Ω exista no circuito da falta para terra, devido as estruturas metálicas de baixa condutibilidade elétrica, o circuito é apresentado na Figura 65 e os resultados na Figura 66.

Figura 65 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 02a: tensão 127 V sem Dispositivo DR com resistência de falta



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

Figura 66 – Tensão da fonte, de contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 02a



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

Os novos resultados são: corrente de choque elétrico igual 177,2 mA, tensão de contato de 110,7 V e uma corrente de curto-circuito igual a 92,2 A. O tempo de desarme do disjuntor de 20 A do quadro de distribuição, a partir da relação da corrente de curto-circuito pela corrente do dispositivo de proteção: $92,2/20 = 4,6I_n$, levada à Figura 40, tem-se 8 s que, considerando o

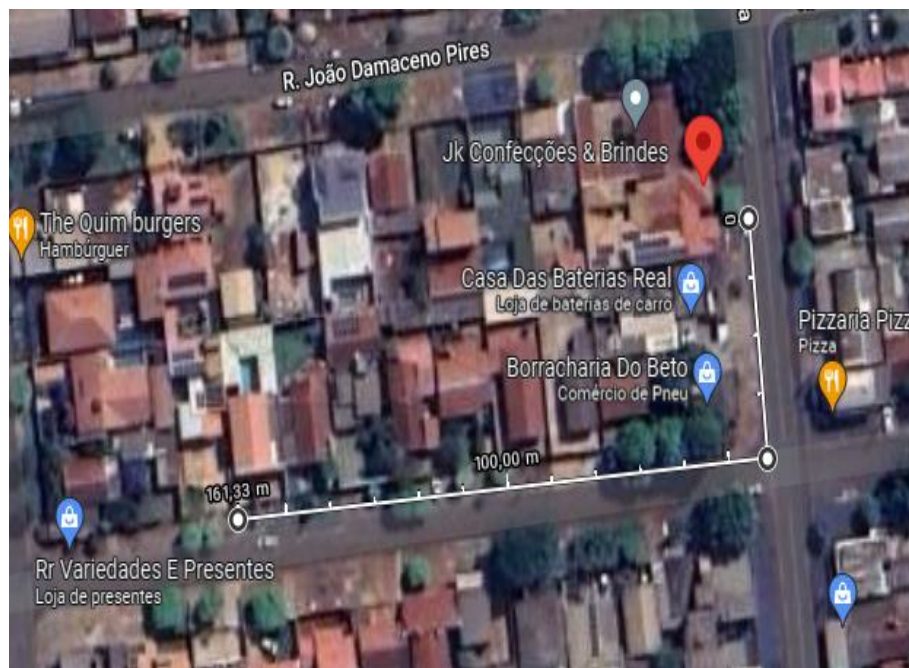
efeito no corpo humano, Figura 19, o ponto encontra-se na Zona 5, onde há o perigo efetivo da ocorrência de fibrilação ventricular.

Assim, considerando a imprevisibilidade da resistência de falta, como o Caso 08, a corrente não aciona o dispositivo magnético e, até o aquecimento do bimetálico para o desarme, ultrapassa o tempo que o organismo humano é capaz de suportar.

4.3 ESTUDO DE CASO 03 DE ACORDO COM A ABNT NBR 5410:2008

Buscou-se no Estudo de Caso 03 considerar uma residência projetada e instalada de acordo com a Norma ABNT NBR 5410:2008, ou seja, com quadro de distribuição, aterramento e dispositivo DR. Trata-se de uma residência construída a três anos (e ainda em finalização), alimentada a partir de um transformador de 75 kVA, na tensão de 220/127 V (ligação bifásica), distante 161 m deste, Figuras 65 e 66.

Figura 67 – Localização e distância da rede de distribuição para o Estudo de Caso 03



Fonte: Google Maps (2022).

Figura 68 – Transformador e padrão de entrada do Estudo de Caso 03



Fonte: Obtidas pela autora (2022).

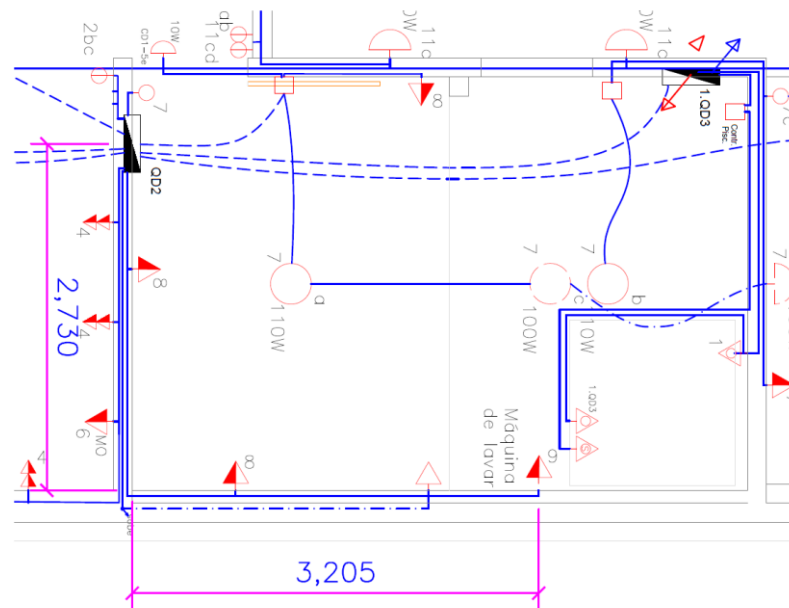
Para o Estudo de Caso 03 ainda foi possível a obtenção do quadro de cargas e a identificação no projeto elétrico do ponto de utilização analisado conforme Quadro 5 e Figura 69. Observa-se que se trata do circuito 9, com potência de 1200 W, alimentado na tensão 220V por cabo 4,0 mm², e protegido por um disjuntor termomagnético bipolar de 20 A. Na Figura 68 ainda é possível determinar a distância do ponto até o quadro, 5,9 m.

Quadro 5 – Quadro de cargas do Estudo de Caso 03

Circuito		Tensão (V)	Local	Iluminação			Tomadas			Aparente Total (VA)	Ip (A)	Cabo (mm ²)	DISJUNTOR		
Nº	Tipo			100 (Qde)	Especificar		100 (Qde)	600 (Qde)	Especif. (VA)				Disjuntor (A)	TIPO	nº de pólos
					Qde	Potência (VA)									
1	TUE	220	QD3 - Piscina					1.200	1.200	5,5	6,0	32	DTM	2	
2	Ilum/tug	127	Ilum. Tom Quarto e Ilum. Cozinha	1	1	160	8		1.060	8,3	2,5	16	DTM	1	
3	TUE	220	Ar condicionado Quarto					1.200	1.200	5,5	4,0	20	DTM	2	
4	TUG	127	Tomada cozinha 1				4	1	1.000	7,9	4,0	20	DTM	1	
11	Res.											16			
5	TUG	127	Tomada cozinha 2				4	1	1.000	7,9	4,0	20	DTM	1	
6	TUE	220	Tom. Micro Ondas						1.000	1.000	4,5	4,0	20	DTM	2
7	Ilum/tug	127	Ilum. área de serviço e área da piscina	6	10	10			700	5,5	2,5	16	DTM	1	
8	TUG	127	Tom. área de serviço				1	2	1.300	10,2	4,0	20	DTM	1	
9	TUE	220	Tom. Máquina de Lavar Roupas						1.200	1.200	5,5	4,0	20	DTM	2
10	TUE	220	Chuveiro						6.500	6.500	29,5	6,0	32	DTM	2
12	Res.		DPS												
13	Res.		DPS												

Fonte: Fornecido pelo proprietário da residência (2022).

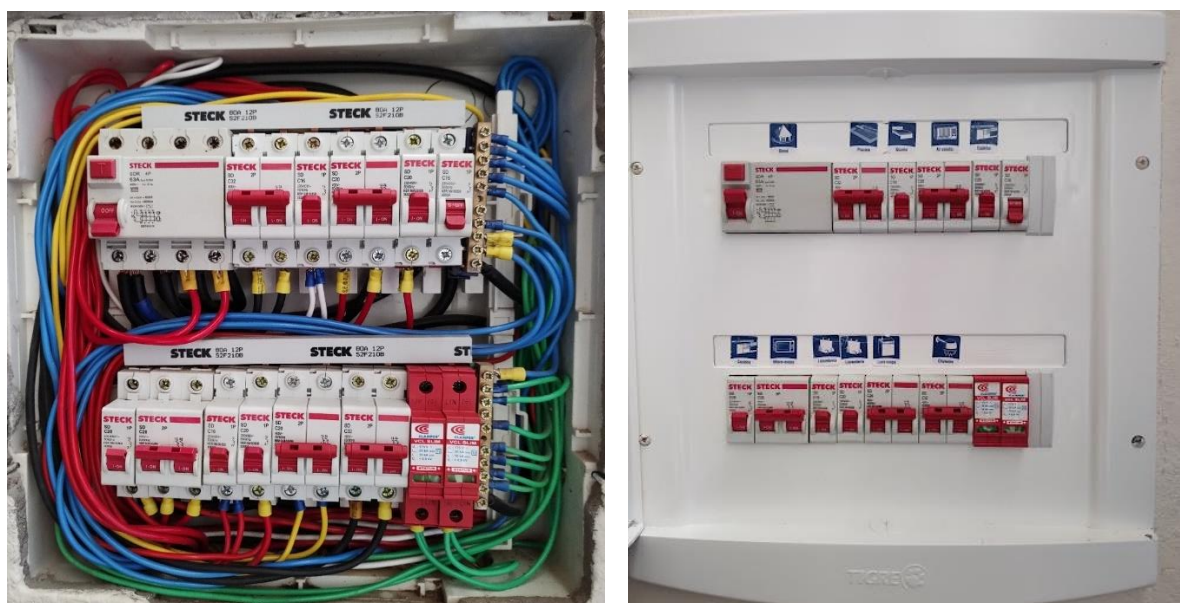
Figura 69 – Localização do ponto de tomada do equipamento do Estudo de Caso 03



Fonte: Fornecido pelo proprietário da residência (2022).

O comprimento do ramal de ligação é de 23 m e o cabo que alimenta o quadro de distribuição é de 10,0 mm² com 25 m. O quadro de distribuição, aberto e com a tampa, podem ser observados na Figura 70 e a advertência exigida em ABNT NBR 5410 (2008) na Figura 71. Por fim, a máquina de lavar roupa identificando a tensão da tomada e o padrão com três pinos (fase, neutro e terra) na Figura 72.

Figura 70 – Quadro de distribuição do Estudo de Caso 03



Fonte: Fornecido pelo proprietário da residência (2022).

Figura 71 – Advertência fixada no quadro de distribuição do Estudo de Caso 03



Fonte: Fornecido pelo proprietário da residência (2022).

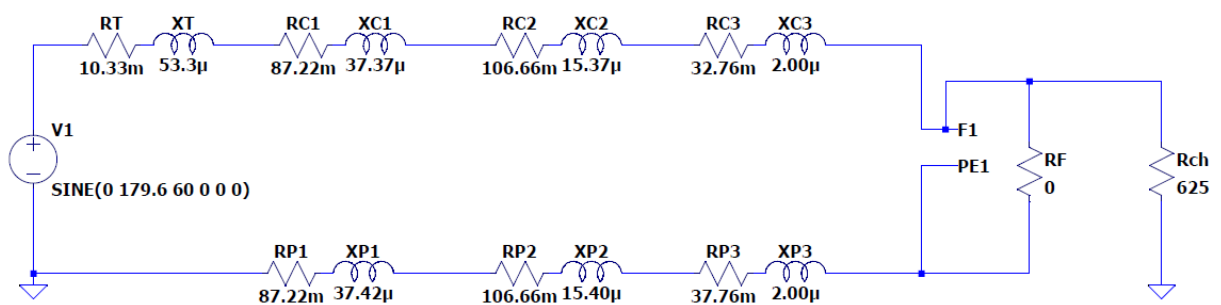
Figura 72 – Máquina de lavar roupa do Estudo de Caso 03



Fonte: Fornecido pelo proprietário da residência (2022).

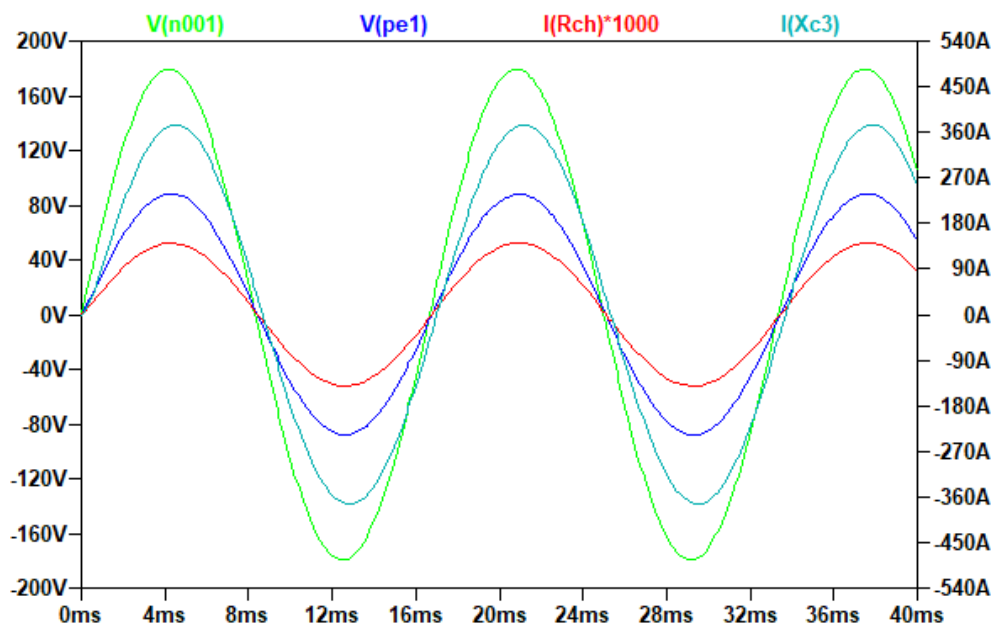
Assim, foram considerados os dados para o circuito equivalente da Figura 72 com resultados apresentados na Figura 73: transformador 75 kVA, rede de distribuição com 138 m (161 – 23: distância do Google Maps menos o ramal de ligação) em alumínio, seção 3x1x70+70 mm²; alimentação do quadro em cabo 10,0 mm² com comprimento de 25 m, totalizando 48 m com o ramal de ligação, e circuito terminal em cabo 4,0 mm² com comprimento de 5,9 m protegido por disjuntor de 20 A em tensão 220 V. Destaca-se, sobretudo, que como circuito da falta considerada é para terra, a tensão será entre fase e neutro, ou seja, 127 V.

Figura 73 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 03: tensão 127 V com Dispositivo DR



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice

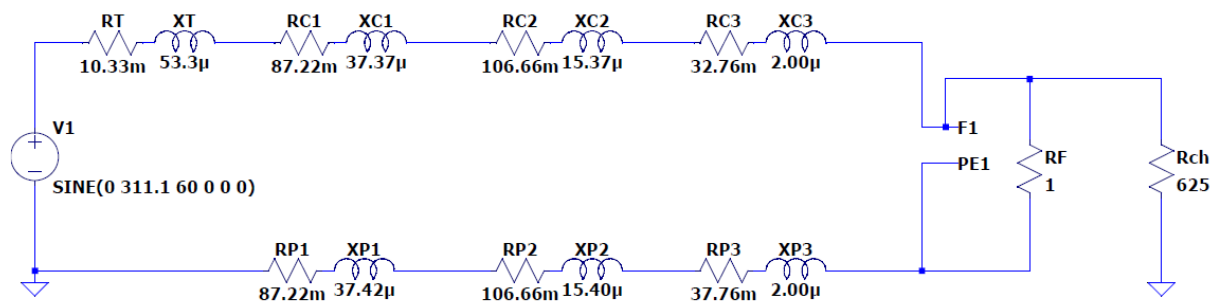
Figura 74 – Tensão da fonte, de contato, corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 03



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

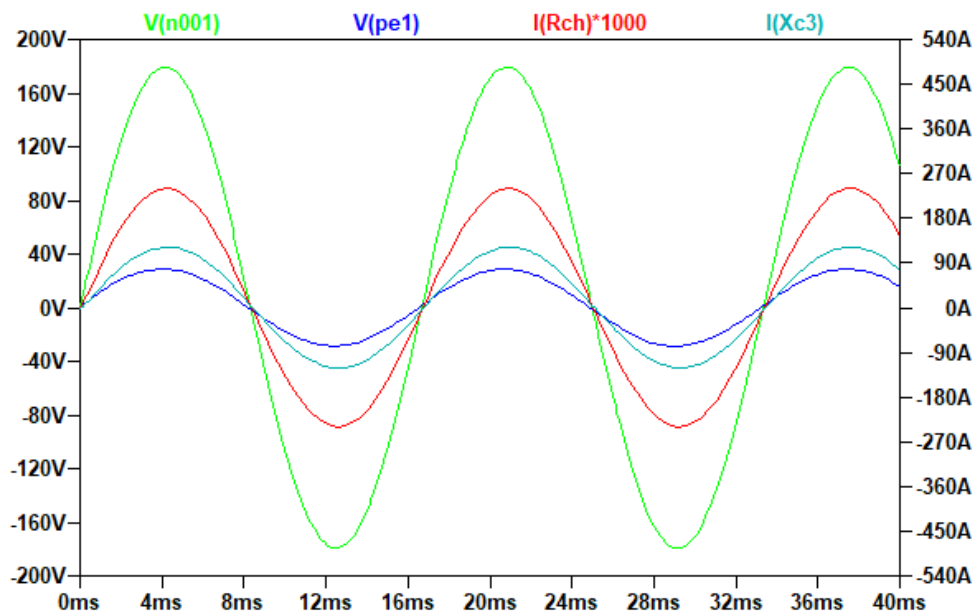
Para o Estudo de Caso 03, os resultados foram: uma corrente de choque elétrico igual 98,9 mA, tensão de contato de 61,8 V e uma corrente de curto-circuito igual a 271,7 A. O tempo de desarme do disjuntor de 20 A no quadro de distribuição, a partir da relação da corrente de curto-circuito pela corrente do dispositivo de proteção: $271,7/20 = 13,6I_n$, que levada à Figura 40, tem-se 11 ms que (para a curva C), considerando o efeito no corpo humano, Figura 19, o ponto encontra-se na Zona 2, onde a corrente não produz nenhum efeito fisiopatológico perigoso, como no Estudo de Caso 2. Considerando, todavia, que uma resistência de 1 Ω exista no circuito da falta para terra, conforme é apresentado na Figura 75, com seus resultados na Figura 76.

Figura 75 – Circuito equivalente do Estudo de Caso 03: tensão 220 V com Dispositivo DR e resistência de falta



Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Figura 76 – Tensão da fonte, de contato e corrente de curto e de choque para o Estudo de Caso 03a

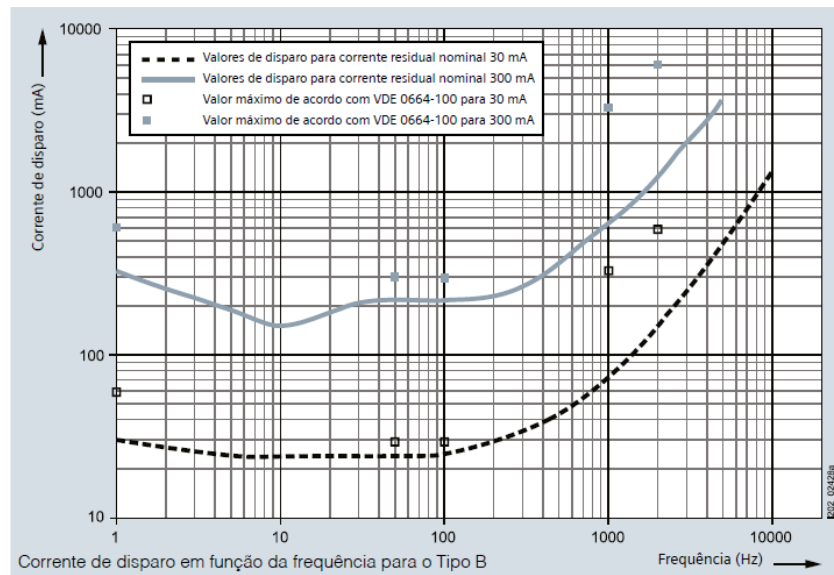


Fonte: Desenvolvido pela autora no LTSpice.

Os novos resultados são: corrente de choque elétrico igual 170,2 mA, tensão de contato de 106,4 V e uma corrente de curto-circuito igual a 86,7 A. O tempo de desarme do disjuntor de 20 A no quadro de distribuição, dado pela Figura 40 a partir da relação da corrente de curto-circuito pela corrente do dispositivo de proteção: $86,7/20 = 4,3I_n$. Levada à Figura 40, tem-se 9 s que, considerando o efeito no corpo humano, Figura 19, o ponto encontra-se na Zona 5, onde há o perigo efetivo da ocorrência de fibrilação ventricular, assim como no Caso 08.

Considerando a situação apresentada, o dispositivo DR atua em um tempo de até 40 ms, limitando, ainda, a corrente de choque em um valor abaixo de 30 mA conforme Figura 77, garantindo, desta forma, a proteção em uma situação de fuga de corrente para carcaça do equipamento, ou através do corpo humano.

Figura 77 – Corrente de desarme de um dispositivo DR em função da frequência



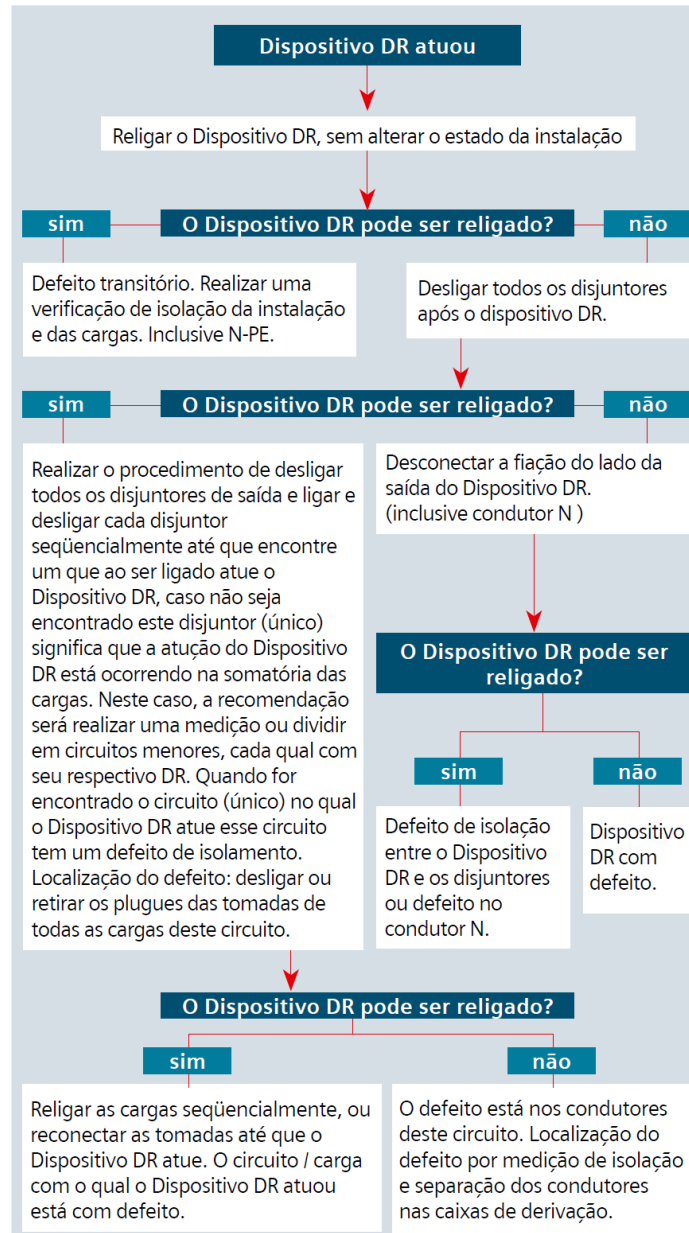
Fonte: Siemens (2022).

Por fim, é comum a desativação do dispositivo DR em caso de atuação. Explica-se, aqui, que, caso o equipamento não esteja defeituoso, há um problema de fuga de corrente nas instalações da residência ou em algum equipamento que necessita ser concertado. A inativação do DR é um erro grave e inconsequente do executor, uma vez que, normalmente o dispositivo é deixado no local (para não ficar o espaço no quadro), sobretudo sem funcionar – trazendo a falsa sensação de proteção contra choque na residência.

Considerando, sobretudo, que, normalmente, o dispositivo DR é instalado protegendo todos os circuitos da residência (assim como no Estudo de Caso 3), é provável que o próprio

morador deva saber o procedimento básico em caso de atuação, assim, segue o roteiro da Figura 78 apresentado pelo fabricante, de acordo com Siemens (2022).

Figura 78 – Roteiro de acionamento ou manutenção de um dispositivo DR



Fonte: Siemens (2022).

4.3.1 Resumo dos Estudos de Casos

Os três Estudos de Caso apresentados buscaram modelar situações representativas das moradias brasileiras: 1 – sem quadro de distribuição, aterramento e dispositivo DR; 2 – sem dispositivo DR e, por último, 3 – considerando as exigências dispostas em ABNT NBR 5410 (2008), Quadro 6.

Quadro 6 – Resultados das simulações considerando nove casos de condição de corrente de falta em moradia

Estudo de Caso	1	1a	2	2a	3	3a	3b
Transformador (kVA)	112,5		112,5		75,0		
Tipo de fornecimento	Monofásico		Bifásico		Bifásico		
Tensão fase e neutro U_0 (V)	127		127		127		
Rede de distribuição (mm ²)	3x1x120+70		3x1x120+70		3x1x70+70		
Comprimento da rede de distribuição (m)	132		108		138		
Ramal de entrada (mm ²)	10		16		10		
Comprimento do ponto de derivação ao quadro ou redução da seção (m)	20		20		25		
Circuito terminal (mm ²)	2,5		2,5		4,0		
Comprimento do circuito terminal (m)	10		10		5,9		
Disjuntor de proteção (A)	40		20		20		
Curva do disjuntor	C		C		C		
Dispositivo Diferencial Residual	não		não		sim		
Ambiente Anexo B	BB3		BB3		BB3		
Aterramento	não	sim	sim		sim		
Resistência de falta (Ω)	0		0	1	0	1	Disp. DR
Impedância do circuito (Ω)	89,210	0,404	0,379	1,380	0,467	1,460	1,460
Corrente de Falta (A)	0,203	314	335	92	271	87	87
Corrente na curva do disjuntor (xI_n) (A)	0,01	7,9	16,8	4,6	13,6	4,3	4,3
Tempo de desarme (s)	Não desarma	4	0,01	8	0,01	9	0,04
Impedância do condutor de proteção (Ω)	89,0	0,217	0,201	1,200	0,227	1,230	1,230
Tensão de contato U_0 (V)	126,7	68,4	67,5	110,7	61,8	106,4	106,4
Impedância do corpo humano (Ω)	625	109	625	625	625	625	625
Corrente do choque (mA)	200	200	108	177	98	170	30
Classe de efeito do choque elétrico	5	4 25% Fibril.	2	5	2	5	2
Consequência do choque	Óbito	Óbito	sem efeito perigoso	Óbito	sem efeito perigoso	Óbito	sem efeito perigoso
Desigualdade $Z_s \cdot I_a \leq U_0$ em 0,2 s	35680 N.A	161 N.A	75 A.	75 A.	93 A.	93 A.	Outra proteção

Abreviações: N.A. – não atende; A. – Atende; Fibril. – Fibrilação ventricular; Z_s – impedância do circuito de falta; I_a – corrente de desarme do disjuntor.

Fonte: Elaborado pela autora

Considerando o Quadro 6 observam-se:

- 1) A ausência do aterramento (Estudo de Caso 1) em uma moradia apresenta risco de morte por choque elétrico, uma vez que uma falta para a carcaça permanecerá e, a partir de um contato com o equipamento haverá o choque sem que haja desligamento do disjuntor.
 - a) A existência do aterramento, sobretudo, sem o quadro de distribuição, protege somente os condutores do padrão de entrada de energia (que é para toda a carga da moradia). A relação da corrente de curto pela corrente do disjuntor traz um número inferior a 10, onde os disjuntores de curva C tem seu desarme térmico com tempos superiores a 4 s, de forma a ultrapassar o limite de permanência em choque elétrico, mesmo para correntes de 50 mA, como observado no Estudo de Caso 1b.
- 2) O Estudo de Caso 2, por sua vez, com a existência do quadro de distribuição, e o disjuntor termomagnético de 20 A, obtém-se maior relação da corrente de curto-circuito pela corrente nominal, superior a 10, acionando-se o dispositivo magnético que atua com 10 ms, protegendo contra choque elétrico – zona 2.
 - a) O mesmo não acontece com a existência de uma resistência de falta – o tempo de acionamento aumenta para 8 s, localizando-se na zona 5, morte por fibrilação ventricular;
- 3) O Estudo de Caso 3, que considera as instalações elétricas conforme ABNT NBR 5410 (2008) foi simulado a partir de três modelos: o primeiro (3) sem dispositivo DR e com resistência de falta igual a zero; o segundo (3a) inserindo a resistência de 1Ω e; o terceiro (3b) permanecendo a resistência, todavia, com o dispositivo DR, conforme instalado na moradia.
 - a) Obtém-se das simulações 3 e 3a as mesmas observações de 2 e 2a. O mesmo não acontece com a existência de uma resistência de falta – o tempo de acionamento aumenta para 8 s, localizando-se na zona 5, morte por fibrilação ventricular;
 - b) A existência do dispositivo DR, por sua vez, mesmo com a resistência de falta, atua para uma corrente de 30 mA em um tempo inferior a 40 ms, protegendo contra acidente por choque elétrico na moradia.
- 4) Por fim, é importante destacar que a proteção permitida para contatos diretos em ABNT NBR 5410 (2008) não é efetiva na existência de resistência de falta, como pode ser observado nos Estudos de Casos modelados conforme 2b e 3a e 3b, onde

a desigualdade é menor que a tensão fase neutro, todavia, a condição do choque leva a óbito.

- 5) É possível considerar que, ainda que disjuntor termomagnético fosse eficiente para contato indireto, não o é para contato direto – que pode ser lido pela generalização dos Casos 1 e 2 e Estudo de Caso 1 onde, a inexistência do condutor de aterramento transforma o circuito modelado em um caso de contato direto.

Para finalizar, destaca-se que Cotrim (2009) define uma tabela de resistências máximas para cada disjuntor, considerando ainda, a tensão 127 V e 220 V, quando o tempo de atuação do dispositivo é de 5 s. Destaca-se que o referido tempo diz respeito a proteção contra contato indireto de equipamentos fixos, de forma que, para equipamentos móveis (ou ligados por tomadas onde se movimenta o cabo de conexão), adotando o tempo de 0,2 s (pode chegar a 0,35 s para 127 V), uma nova tabela pode ser desenvolvida.

Considerando a Equação 1, que determina que a impedância do percurso da corrente de falta para massa multiplicada pela corrente de desarme do disjuntor deve ser menor que a tensão fase neutro ($Z_S \cdot I_a \leq U_0$), tem-se: I_a é igual a $5I_n$, $10I_n$ e $20I_n$ para as curvas de desarme B, C e D conforme Figura 40. Assim, substituindo as correntes dos disjuntores, a tensão fase neutro e os fatores multiplicadores, resulta na Tabela 5.

Tabela 5 – Impedância do percurso da corrente de falta fase-massa ($Z_{S\text{máx}}$) quando a proteção contra contatos indiretos é realizada por disjuntores em caixa moldada conforme NBR NM 60898, considerando-se o tempo de seccionamento de 0,2 segundos

Corrente nominal I_n (A)	$Z_{S\text{ Máx}} (\Omega)$					
	$U_0 = 127\text{ V}$			$U_0 = 220\text{ V}$		
	Curvas			Curvas		
	B $5I_n$	C $10I_n$	D $20I_n$	B $5I_n$	C $10I_n$	D $20I_n$
10	2,540	1,270	0,635	4,400	2,200	1,100
16	1,588	0,794	0,397	2,750	1,375	0,688
20	1,270	0,635	0,318	2,200	1,100	0,550
25	1,016	0,508	0,254	1,760	0,880	0,440
32	0,794	0,397	0,198	1,375	0,688	0,344
40	0,635	0,318	0,159	1,100	0,550	0,275
50	0,508	0,254	0,127	0,880	0,440	0,220
63	0,403	0,202	0,101	0,698	0,349	0,175

Fonte: Elaborado pela autora

Conclui-se que a curva de desarme B apresenta-se adequada para maiores valores de impedância do percurso da corrente de fase-massa, chegando a 2,540 Ω para a tensão 127 V e 4,400 Ω para 220 V. Destaca-se que a referida Tabela pode cobrir um conjunto de acidentes por contato indireto definido pela resistência de falta igual a 0 Ω , sobretudo, a resistência não observada pelo projetista, em especial por não ser possível sua determinação, quando adicionada a análise, ultrapassa os limites da resistência do percurso da corrente fase-massa descaracterizando as premissas utilizadas (impedância do transformador e dos cabos).

A Tabela 5 pôde, ainda, ser validade pelos Casos e Estudos de Casos realizados – observado a resistência de falta igual a 0 Ω , ou, ainda, na consideração do cálculo da resistência inserida (e presumida) de 1 Ω . Por fim, circuitos com resistências do percurso de fase-massa acima de a 2,540 Ω para a tensão 127 V e 4,400 Ω para 220 V (do transformador e cabos), já de início, pode ser considerado como desprotegido contra contato indireto, para valores dentro da faixa constante na Tabela 5 podem proteger dependendo da existência de uma resistência de falta. Esta resistência, por sua vez, quando tende a infinito, caracteriza o modelo em uma condição de contato direto. Novamente lembra-se que, o disjuntor termomagnético não é suficiente para proteção contra contato direto.

5 CONCLUSÃO

É notória a importância da energia elétrica nas moradias, caracterizada, sobretudo, pelo conforto e praticidade que pode trazer às residências – o crescimento do PIB e da oferta per capita de energia pode também ser um indicador dos impactos positivos para um país. Com 26,4% do consumo nacional de energia elétrica, o número de domicílios vem, ainda, crescendo a uma de 2% ao ano, enquanto a população a 1%, considerado o período de 2005 a 2015.

Os benefícios da energia, sobretudo, são marcados por situações indesejáveis no Brasil. Ao aumento do consumo residencial de eletricidade associa-se o crescimento de 6,6 % de mortes por acidente de origem elétrica, alcançando, em 2021, somente por choque elétrico, 674 vítimas, 47 por incêndio e 40 por descarga atmosférica.

Destaca-se que o fio partido ou sem isolamento foi responsável por 37 vítimas em 2021, enquanto os eletrodomésticos/eletroeletrônicos, 31, extensão, benjamim, tomadas etc., 23, cerca energizada 23, carregador de celular 16, dentre outros. Pode, ainda, caracterizar os fios partidos ou sem isolamento, as extensões, benjamins, tomadas etc. e carregador de celular como choque por contato direto, enquanto eletrodomésticos/eletroeletrônicos e as cercas energizadas por contato indireto. Mais detalhadamente, a geladeira e freezer foram responsáveis por 13 mortes, enquanto a máquina de lavar e tanquinho 9, ar-condicionado e ventilador 4 e chapinha, secador e *babyliss* também 4 vítimas.

O Raio x das instalações elétricas residenciais brasileiras, pesquisa desenvolvida pela ABRACOPEL e pelo PROCOBRE em 2016 em 999 residência do Brasil apresentou como cenário a autoconstrução em 75 % dos imóveis pesquisados, 48% sem aterramento, 37 % dos quadros de distribuição em alto risco e a ausência do dispositivo DR em 79 % das moradias - vindo de encontro aos altos índices de acidentes de origem elétricas nas residências e justificando a importância deste estudo.

Considerando o estudo do choque elétrico, foi apresentada a proteção básica, definida para contatos diretos e a proteção supletiva para contatos indiretos. Uma vez que a primeira possa ser protegida pela isolamento, barreira, obstáculos o distanciamento (colocando fora do alcance), a segunda necessita de equipotencialização, isolamento reforçada, separação elétrica e a existência de locais não condutivos, ambas como proteção passiva.

A proteção ativa, por sua vez, refere-se à limitação da tensão em 12 V e 25 V, indicadas como SELV, para, por exemplo, piscinas e tomadas de banheiro, respectivamente, sobretudo,

não abordada neste trabalho. Por outro lado, o seccionamento automático – disjuntor termomagnético – e o dispositivo DR foram analisados ao longo do trabalho visando contribuir para a redução dos acidentes por choque elétrico.

Modelando um circuito composto pelo transformador, cabo e comprimento da rede de distribuição, condutor e comprimento do ponto de derivação até o quadro de distribuição (ou a redução da seção do cabo, na inexistência deste), e o circuito terminal (condutor e comprimento) foram calculadas as correntes de curto-circuito, de choque elétrico, a tensão de contato, verificado o tempo de atuação da proteção e o efeito no corpo humano considerando a metodologia apresentada por Cotrim (2009) em 9 Casos modelos e 3 Estudos de Casos.

Das nove condições simuladas, o choque elétrico previsto leva a óbito em seis delas. Para os Casos 1 e 2 (inexistência de quadro e aterramento) a corrente de choque elétrico permanece enquanto houver o contato, ocasionando, assim, a morte, uma vez que o disjuntor do padrão de entrada de energia não atua para a corrente que flui pelo corpo humano. Com a ligação do aterramento (Casos 3 e 4), a corrente de curto é suficiente para atuar o disjuntor através do dispositivo térmico, de forma que o tempo é superior e a corrente de choque também levam a óbito.

Os Casos 5, 6 e 7, para a análise do contato indireto, possuem quadro de distribuição e o disjuntor é adequado ao condutor do circuito terminal (20 A). Nesta condição tem-se: Caso 5 – tensão de 220 V apresenta corrente de curto circuito superior a $10I_n$, de forma que o dispositivo magnético atua em 20 ms; Caso 6 leva a óbito pelo mesmo motivo que 3 e 4 e; por último, o Caso 6, apesar da tensão menor, 127 V possui instalado um disjuntor de curva B, de forma que a corrente de curto-circuito é superior a $5I_n$, não trazendo efeitos perigosos.

No Caso 8 é inserido uma resistência de falta que, somada a do circuito existente, reduz a corrente de curto-circuito e aumenta o tempo de desarme – como consequência leva a morte por choque elétrico. Destaca-se, ainda, para este Caso, que a disposição da ABNT NBR 5410 (2008) é insuficiente para garantir a proteção supletiva (contato indireto), uma vez que desconsidera, ainda que não seja possível se prever, o efeito da resistência de falta no cálculo.

Por último, dentre os Casos modelados, encontra-se uma instalação que considera os procedimentos definidos pela ABNT NBR 5410 (2008) quanto a proteção básica e supletiva, ou ainda contato direto e indireto. Para esta condição o sistema está completamente protegido para contatos diretos e indiretos através do dispositivo DR que desliga o circuito para uma corrente e tempo inferiores a 30 mA e 40 ms, respectivamente.

Ao abordar os Estudos de Caso, destaca-se que, para as condições reais de potência do transformador, seção e comprimento dos condutores, os resultados são similares aos Casos

modelados. O Estudo de Caso 1, semelhante ao Caso 2, leva a óbito considerando a permanência da corrente de choque, sem que haja desligamento do disjuntor existente no padrão de energia. É importante destacar que esse tipo de instalação está, também, exposto a sobrecarga dos condutores de menor seção a jusante de disjuntores que não os protegem – tal situação está sujeita ao sobreaquecimento, levando ao incêndio da moradia, considerando as condições dos elementos combustíveis nas proximidades.

O Estudo de Caso 2 e 2a, semelhantes aos Casos 5 e 8 tem o desarme do disjuntor pelo dispositivo magnético para o primeiro e térmico para o segundo, em uma condição de corrente e tempo de choque sem efeitos perigosos, e superior ao que o corpo humano suporte, respectivamente.

O Estudo de Caso 3, 3a se assemelha a situação apresentada para 2 e 2a, enquanto 3b possui dispositivo DR, assim como o caso 9. Novamente, destaca-se que em 2b e 3b, é a inserção da resistência de falta de 1Ω que, não considerada no cálculo pela metodologia disposta em ABNT NBR 5410 (2008), leva a obtenção de resultados diferentes dos simulados. Pondera-se que tal definição refere-se à proteção contra contato indireto, sendo, sobretudo, obrigatória a instalação do dispositivo DR para o ambiente úmido simulado neste trabalho (BB3).

Observa-se, ainda, que o uso de disjuntores com curva de desarme B podem, a partir da redução da corrente de disparo magnético (de $10I_n$ para $5I_n$) e, conseqüentemente, do tempo de acionamento, ampliar a possibilidade de proteção contra curto-circuito, uma vez que está associado a uma impedância maior relativa ao circuito da corrente fase massa.

Conclui-se, por fim, que o atendimento da norma ABNT NBR 5410: Instalações Elétricas em Baixa Tensão é uma condição necessária para a proteção da vida em moradias. Que a possível causa dos acidentes com choque elétrico em residência perpassa, primeiramente a uma condição social, uma vez que 75 % dos pesquisados constituíam-se em auto construção e que 87 % das 48 % das edificações tratava-se de famílias pertencente a Classe D – ao que se entende que a falta de recurso pode levar a construções sem as devidas proteções contra choque elétrico.

Outra causa plausível, fundamenta-se na questão cultural, justificando os casos que recursos não constitui o impeditivo para a compra e instalação dos dispositivos de proteção. Entende-se que o investimento na contratação do profissional adequado para o projeto e a execução da obra perpassa pela valorização do trabalho e do trabalhador capacitado e habilitado para cada serviço. Ainda sobre a questão cultural, a imprevisibilidade das variáveis aleatórias – resistência do corpo, de contato e a própria resistência de falta – traz conseqüências também

aleatórias, de forma que os casos em que o choque não provoca efeitos perigosos estimula a negação do risco, em especial para aqueles cujo conhecimento está fundamentado pelo senso comum e, às vezes, ao desconhecimento ou desrespeito as legislações vigentes.

Por fim, sugere-se como trabalho futuro, a pesquisa do efeito da geração solar fotovoltaica para as condições de proteção contra choques elétricos nas moradias, o estudo sobre a resistência de falta, bem como a análise de causa e efeito em casos reais de choque elétrico a partir de diferentes consequências possíveis.

REFERÊNCIAS

ABRACOPEL – Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade. **Anuário estatístico de acidentes de origem elétrica 2022 – Ano base 2021**. Salto-SP: Abracopel, 2022.

ABRACOPEL & PROCOBRE. **Raio x das instalações residenciais brasileiras**. São Paulo - SP: Abracopel, 2017.

Alemetec Elétrica. **Sistema de aterramento elétrico**. 2019 Disponível em: <<https://alemetec.blogspot.com/2019/07/Sistema-de-Aterramento-Eletrico.html>>. Acesso em: ago/22.

ANALOG DIVICES. **LTSpice**. Software para simulação de circuitos analógicos. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>>. Acesso em jun/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, versão corrigida 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 60529: Graus de proteção providos por invólucros (Códigos IP)**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 60898: Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares (IEC 60898:1995, MOD)**. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Nacional de Energia (PNE 2050)**. 2020. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em out/2022.

COTRIM, Ademaro A.M.B. **Instalações elétricas**. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 511p, 2009.

CT SERVICES SOLUÇÕES EM AUTOMAÇÃO. **Disjuntor termomagnético e suas curvas de curto circuito**. Disponível em <<https://ctservicessolucoesemautomacao.blogspot.com/2018/02/disjuntor-termomagnetico-e-suas-curvas.html>>. Acesso em nov/2022.

ENERGISA. **Norma de Distribuição Unificada NDU – 006: Critérios Básicos para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas**. João Pessoa – PB, versão 5.0 Energisa, ago/2018.

Engenharia 360. **Como a energia elétrica dos postes de rua chega às tomadas da sua casa? | 360 Explica**. Disponível em: < <https://engenharia360.com/como-a-energia-eletrica-chega-nas-tomadas-da-casa/>>. Acesso em jun/22.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2022**: Ano base 2021, 2022. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em out/2022.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional (BEN)**: Relatório Síntese 2022a - Ano base 2021. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em out/2022.

FERGÜTZ, Marcos. **Corrente de curto-circuito: método simplificado**. Apresentação de aula. 25p. 2016. UDESC. Disponível em: < https://www.academia.edu/42164714/CORRENTE_DE_CURTO_CIRCUITO_M%C3%89TODODO_SIMPLIFICADO>. Acesso em jun/22.

FILHO, João Mamede. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. LTC, 2017.

GOLDEMBERG, José. **Energia e desenvolvimento**. Estudos Avançados, [S. l.], v. 12, n. 33, p. 7-15, 1998. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/9402>. Acesso em: 9 dez. 2021.

HAFNER, Angelo. **Correntes de curto-circuito**. Youtube, 16 Out. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=U0FMqUwGJRQ>>. Acesso em out/2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Tábua completa de mortalidade no Brasil - 2019**. Breve análise da evolução da mortalidade no Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

JOSÉ, Alexandre. **Campanha alerta sobre riscos de acidentes envolvendo a rede elétrica**. Disponível em: <<https://alexandrejose.com/2019/08/campanha-alerta-sobre-riscos-de-acidentes-envolvendo-a-rede-eletrica/>>. Acesso em nov/2022.

KITCHER, Christopher. *A practical guide to the 17th edition of the wiring regulations*. First edition. Oxford, 2010.

LITTELFUSE. *Electrical safety hazards handbook*. 76p. Disponível em: < www.littelfuse.com>. Acesso em jun/22.

MARTIM, Matheus. **Dispositivo diferencial Residual (DR) – Conceitos # 005**. Disponível em: < <https://matheusmartim.blogspot.com/2017/03/dispositivos-diferencial-residual-dr.html>>. Acesso em jun/22.

MORENO, H. **Qual a diferença entre aterrar e equipotencializar?** Allnec, 2016. Disponível em: <<https://www.allnec.com.br/2016/11/08/qual-a-diferenca-entre-aterrar-e-equipotencializar/>>. Acesso em jan/2022.

PEGO GROUP. **Equipamento de teste ambiental dos jogos da ponta de prova do código do IP IEC60529 12 meses de garantia.** Disponível em: <<https://portuguese.electricalsafety-testequipment.com/sale-12312371-iec60529-ip-code-probe-kits-environmental-test-equipment-12-months-warranty.html>>. Acesso em jun/2022.

PROJETOS HABITISSIMO. **Reforma de instalação elétrica.** <<https://projetos.habitissimo.com.br/projeto/reforma-de-instalacao-eletrica>>. Acesso em nov/2022.

REFRIMAQ DICAS E CURSOS. **Choque na máquina de lavar roupas, como resolver?.** Youtube, 1 Jul. 2019. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Bk1NqoXsNJk&t=2s>>. Acesso em jul/2022.

SIEMENS. **Catálogo Siemens de Produtos no Brasil.** Disponível em: <<https://new.siemens.com/br/pt/produtos/catalogos.html>>. Acesso em nov/2022.

SOUZA, José R. A.; MORENO, Hilt. **Guia Eletricidade Moderna da NBR 5410:** Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Revista Eletricidade Moderna. 170p. 2001.

U.S. Department of Labor - Occupational Safety and Health Administration. **Electrical Safety in the Workplace.** 2008. Disponível em: <https://www.osha.gov/sites/default/files/2019-03/electrical_safety_manual.pdf>. Acesso em jun/22.

ANEXO A – COMPETÊNCIA DAS PESSOAS

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BA1	Comuns	Pessoas inadvertidas	—
BA2	Crianças	Crianças em locais a elas destinados ¹⁾	Creches, escolas
BA3	Incapacitadas	Pessoas que não dispõem de completa capacidade física ou intelectual (idosos, doentes)	Casas de repouso, unidades de saúde
BA4	Advertidas	Pessoas suficientemente informadas ou supervisionadas por pessoas qualificadas, de tal forma que lhes permite evitar os perigos da eletricidade (pessoal de manutenção e/ou operação)	Locais de serviço elétrico
BA5	Qualificadas	Pessoas com conhecimento técnico ou experiência tal que lhes permite evitar os perigos da eletricidade (engenheiros e técnicos)	Locais de serviço elétrico fechados

¹⁾ Esta classificação não se aplica necessariamente a locais de habitação.

Fonte: ABNT NBR 5410 (2008).

ANEXO B – RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO CORPO HUMANO

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BB1	Alta	Condições secas	Circunstâncias nas quais a pele está seca (nenhuma umidade, inclusive suor)
BB2	Normal	Condições úmidas	Passagem da corrente elétrica de uma mão à outra ou de uma mão a um pé, com a pele úmida de suor, sendo a superfície de contato significativa
BB3	Baixa	Condições molhadas	Passagem da corrente elétrica entre as duas mãos e os dois pés, estando as pessoas com os pés molhados ao ponto de se poder desprezar a resistência da pele e dos pés
BB4	Muito baixa	Condições imersas	Pessoas imersas na água, por exemplo em banheiras e piscinas

Fonte: ABNT NBR 5410 (2008).

ANEXO C – CONTATO DAS PESSOAS COM O POTENCIAL DE TERRA

Código	Classificação	Características	Aplicações e exemplos
BC1	Nulo	Locais não-condutivos	Locais cujo piso e paredes sejam isolantes e que não possuam nenhum elemento condutivo
BC2	Raro	Em condições habituais, as pessoas não estão em contato com elementos condutivos ou postadas sobre superfícies condutivas	Locais cujo piso e paredes sejam isolantes, com elementos condutivos em pequena quantidade ou de pequenas dimensões e de tal forma a probabilidade de contato possa ser desprezada
BC3	Freqüente	Pessoas em contato com elementos condutivos ou postadas sobre superfícies condutivas	Locais cujo piso e paredes sejam condutivos ou que possuam elementos condutivos em quantidade ou de dimensões consideráveis
BC4	Contínuo	Pessoas em contato permanente com paredes metálicas e com pequena possibilidade de poder interromper o contato	Locais como caldeiras ou vasos metálicos, cujas dimensões sejam tais que as pessoas que neles penetrem estejam continuamente em contato com as paredes. A redução da liberdade de movimentos das pessoas pode, por um lado, impedi-las de romper voluntariamente o contato e, por outro, aumentar os riscos de contato involuntário

Fonte: ABNT NBR 5410 (2008).

ANEXO D – DADOS CARACTERÍSTICOS DE TRANSFORMADORES

Potência kVA	Tensão V	Perdas em W		Rendimento	Regulação	Impedância
		A vazio	Cobre	(%)	(%)	(%)
15	220 a 440	120	300	96,24	3,32	3,5
30	220 a 440	200	570	96,85	3,29	3,5
45	220 a 440	260	750	97,09	3,19	3,5
75	220 a 440	390	1.200	97,32	3,15	3,5
112,5	220 a 440	520	1.650	97,51	3,09	3,5
150	220 a 440	640	2.050	97,68	3,02	3,5
225	380 ou 440	900	2.800	97,96	3,63	4,5
300	220	1.120	3.900	97,96	3,66	4,5
	380 ou 440		3.700	98,04	3,61	4,5
500	220	1.700	6.400	98,02	3,65	4,5
	380 ou 440		6.000	98,11	3,6	4,5
750	220	2.000	10.000	98,04	4,32	5,5
	380 ou 440		8.500	98,28	4,2	5,5
1.000	220	3.000	12.500	98,10	4,27	5,5
	380 ou 440		11.000	98,28	4,19	5,5
1.500	220	4.000	18.000	98,20	4,24	5,5
	380 ou 440		16.000	98,36	4,16	5,5

Fonte: Fergütz (2016).

**ANEXO E – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS CONDUTORES
MULTIPLEXADOS CA/CAL ISOLADOS COM NEUTRO NU – XLPE
0,6/1 KV**

Construção Fase/Neutro (CA/CAL)	Reatância Indutiva (XLF)	Corrente Admissível no Condutor Fase	Resistência Elétrica do Condutor Fase	Mensajeiro (CAL)	
		Temperatura nominal 90 °C	Resistência Elétrica 90 °C	Corrente Admissível 90 °C	Resistência Elétrica 90 ° C
mm ²	W / km	Ampères	W / km	A	W / km
1x1x25+25 (*)	0,1422	93	1,5387	61	1,5387
1x1x35+35 (*)	0,10579	118	1,1127	74	1,2506
2x1x25+25 (*)	0,1422	79	1,5387	61	1,5387
2x1x35+35 (*)	0,10579	97	1,1127	74	1,2506
3x1x35+35	0,10579	97	1,1127	62	1,2506
3x1x70+70	0,09662	154	0,571	98	0,632
3x1x120+70	0,07185	224	0,3414	140	0,632

Fonte: ENERGISA: NDU 006 (2022) – Tabela 22.

ANEXO F – IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA DE CABOS

Seção	Impedância de sequência positiva (mΩ/m)	
	Resistência	Reatância
2,5	8,8882	0,1345
4	5,5518	0,1279
6	3,7035	0,1225
10	2,2221	0,1207
16	1,3899	0,1173
25	0,8891	0,1164
35	0,6353	0,1128
50	0,445	0,1127
70	0,3184	0,1096
95	0,2352	0,109
120	0,1868	0,1076
150	0,1502	0,1074

Fonte: Adaptado de Mamede Filho (2017).